



Patrick Daniel
Martins Rodrigues

Desenvolvimento de um sistema de voo para
Indústria de Entretenimento



**Patrick Daniel
Martins Rodrigues**

Desenvolvimento de um sistema de voo para Indústria de Entretenimento

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Francisco José Malheiro Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar da Departamento de Engenharia Mecânica (co-orientador)

Prof. Doutor Mário Augusto Pires Vaz

Professor Associado Com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos / Acknowledgements

Quero agradecer pela ajuda na conclusão desta Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica:

Ao meu orientador Professor Doutor Francisco Queirós de Melo e ao co-orientador Professor Doutor José Paulo Santos por terem aceite desenvolver esta dissertação comigo, demonstrando sempre imensa disponibilidade quando necessitei;

À Professora Doutora Mónica Oliveira pela amizade demonstrada durante o curso;

Aos meus pais que sem a extrema paciência e motivação nunca teria terminado este curso. Mami e Papi, finalmente já está!!!

Ao meu irmão que sempre foi uma referência para mim mesmo estando longe;

A todos os amigos que fiz durante esta longa caminhada e que foram sempre impecáveis comigo. Sem vocês nada disto seria possível!

Um agradecimento especial ao Ricardo Carranca pelo apoio e por ter acreditado e puxado por mim mesmo quando a minha motivação era quase nula;

À Raquel pelo amor, apoio, motivação e paciência durante todos estes anos. Foste a minha muleta!

A todos um verdadeiro OBRIGADO!!

Palavras-chave

Engenharia no Teatro; Cinemática e Dinâmica incremental num sistema de voo 2 e 3D; Sistemas hiperestáticos de estruturas por cabos; Sistema de rotação.

Resumo

A Indústria do Entretenimento, principalmente nas áreas do Cinema e do Teatro, têm vindo a recorrer a poderosos mecanismos de engenharia de ponta, já desenvolvidos para outras indústrias, na tentativa de melhorar as cenas visuais imaginadas por um director de produções. Assim, nos últimos anos tem-se notado um desenvolvimento de inúmeras novas soluções dedicadas a estas áreas.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação centrou-se no mundo do espectáculo teatral, não obstante, poderá ser importado para outras áreas de investigação onde este estudo possa ser valorizado.

O objectivo principal desta dissertação de mestrado trata do desenvolvimento de um produto, neste caso de um sistema de rotação motorizado, para concorrer directamente com os mecanismos existentes no mercado mas com custos extremamente elevado. Foi igualmente necessário o dimensionamento de uma estrutura de sustentação por meio de cabos para incorporar o sistema de rotação desenvolvido. Foi ainda efectuado um estudo para verificar o comportamento cinemático e dinâmico do sistema na realização de um voo num espaço tridimensional, com uma trajectória complexa previamente definida.

Keywords

Engineering in the Theatre; Incremental Kinematics and Dynamics during a 2 and 3D flights; Hyperstatic systems in cables' structures; Rotational system.

Abstract

The Entertainment Industry mainly in what concerns Cinema and Theatre, has been using the latest powerful engineering mechanisms, already developed for other industries on the attempt to improve the visual scenes imagined by the director. Thus, in the last years, it has been noticed a development of numerous new solutions among these areas.

The work done in this dissertation was focused on the world of theatrical performance. However, it can be used into other research areas where this study can be valued.

The main purpose of this dissertation discusses the development of a product, in this case a motorized rotational system, to compete directly with other mechanisms that already exist on the market with extremely high costs. It became necessary to design a supporting structure by means of cables to embed the developed rotational system. It was also studied the kinematic and dynamic behaviour of the system during a flight in a two and three dimensional space with a complex predefined trajectory.

Conteúdo

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Contextualização em engenharia	4
1.2	Automação no espectáculo	5
1.2.1	Maquinaria debaixo do palco	5
1.2.2	Maquinaria acima do palco	6
2	Objectivos	7
3	Revisão do Estado da Arte	9
3.1	Sistemas de voo manuais	9
3.1.1	Modelo simples de conjunto de cordas	9
3.1.2	Modelo de cordas com contrapeso	10
3.2	Sistemas de voo motorizados	11
3.3	Componentes de elevação motorizados	12
3.3.1	Guinchos	12
3.3.1.1	<i>Fleet Angle</i> VS <i>Zero Fleet</i>	13
3.3.1.2	Travões de Guinchos	14
3.3.1.3	Motores	14
	Motores DC	15
	Motores AC	15
	Servomotores AC	15
3.4	Voo de artistas	16
3.4.1	Sistema de voo 1D	16
3.4.2	Sistema de voo 2D	17
3.4.2.1	Um guincho com carrinho	17
3.4.2.2	Dois guinchos fixos	18
3.4.3	Sistema de voo 3D	19
3.4.3.1	Carrinho rotativo	19
3.4.3.2	Múltiplos guinchos	20
3.5	Soluções existentes	21
3.5.1	<i>Spidercam</i>	21
3.5.2	<i>r3 Rope Robot</i>	22
3.5.3	Lustre do <i>Phantom of the Opera</i> no teatro <i>The Venetian</i>	23
3.5.4	<i>Spider-Man: Turn Off the Dark</i>	24

II	Métodos e Modelos	27
4	Desenvolvimento do sistema de rotação	29
4.1	Desenvolvimento Conceptual	29
4.2	Desenvolvimento do sistema e análise morfológica	30
4.3	Modelação 3D e Foto realismo	32
5	Dimensionamento 2D	35
5.1	Cinemática incremental 2D	35
5.2	Dinâmica incremental 2D	38
5.3	Apresentação e discussão dos resultados	40
6	Dimensionamento 3D	43
6.1	Cinemática incremental 3D	44
6.2	Dinâmica incremental 3D	52
6.3	Apresentação e discussão dos resultados	52
III	Conclusões e Trabalho Futuro	57
7	Conclusões e Trabalho Futuro	59

Lista de Tabelas

4.1	Análise morfológica do sistema de voo.	31
-----	--	----

Lista de Figuras

1.1	Lucros <i>Broadway</i>	3
1.2	Componentes mecânicos invisíveis.	4
1.3	Elevador de palco.	5
1.4	Barco a voar sobre o palco	6
1.5	Sistema de luzes	6
2.1	Modelo 3D a desenvolver.	7
3.1	Modelo manual simples.	10
3.2	Modelo manual de contrapeso.	11
3.3	Modelo motorizado.	11
3.4	<i>Fleet Angle VS Zero Fleet Angle</i>	14
3.5	Esquema 1D.	17
3.6	Esquema 2D - guincho com carrinho.	18
3.7	Esquema 2D - dois guinchos fixos.	18
3.8	Esquema de múltiplos guinchos fixos	20
3.9	<i>Spidercam</i>	21
3.10	<i>Cama r3 rope robot</i>	22
3.11	Lustre no teatro <i>The Venetian</i>	23
3.12	Curvatura das guias.	24
3.13	<i>Spider-Man: Turn Off the Dark</i>	25
4.1	Comparação dos conceitos propostos para o sistema de rotação.	30
4.2	Proposta de modelação CAD para o sistema de voo.	32
4.3	Fotorrealismo do sistema de voo proposto.	33
5.1	Esquema do voo 2D	35
5.2	Método do triângulo.	37
5.3	Componentes da posição, da velocidade e da aceleração instantânea	40
5.4	Velocidades e Acelerações absolutas para cada instante	40
5.5	Tensões nos cabos em cada incremento para o estudo cinemático e dinâmico	41
6.1	Interpolação linear VS B-Spline	44
6.2	Esquema da trajetória 3D - equações paramétricas	45
6.3	Pontos importados do <i>software</i>	46
6.4	Esquema da trajetória 3D - <i>B-Spline</i>	47
6.5	Ângulos na projecção OXY	49
6.6	Cabo 7x19 aço inoxidável AISI316 utilizado	50

6.7	Componentes da posição, da velocidade e da aceleração instantânea	52
6.8	Velocidades e Acelerações absolutas para cada instante	53
6.9	Tensões nos cabos em cada incremento para o estudo dinâmico	54
6.10	Gráfico para a escolha do guincho e guincho escolhido	55

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

Actualmente a Indústria do Entretenimento encontra-se em pleno crescimento, das quais se destacam o Cinema e os Teatros. Conceitos como realidade virtual e controlo de movimento ajudaram em muito o desenvolvimento e, conseqüentemente, o acelerar do crescimento das indústrias em causa.[12] Com o aumento da procura, torna-se fundamental inovar no que a novos efeitos diz respeito, pois o público vai-se tornando cada vez mais exigente. Sequências de voo inovadores, principalmente quando executados por pessoas, são o clímax para uma audiência.

A *Broadway* que se situa em Nova Iorque, Estados Unidos da América, é um bom caso de estudo para este crescimento abrupto. Esta rua é conhecida pelos seus famosos teatros que exibem superproduções de musicais e que se mantêm em cena durante vários anos, quando a procura assim o exige. Em termos numéricos, a *Broadway* teve um ganho anual na época de 1984/85 de 209 milhões de dólares americanos e, na época presente, 2011/12, já leva um lucro de 1139 milhões de dólares - figura 1.1.[2]

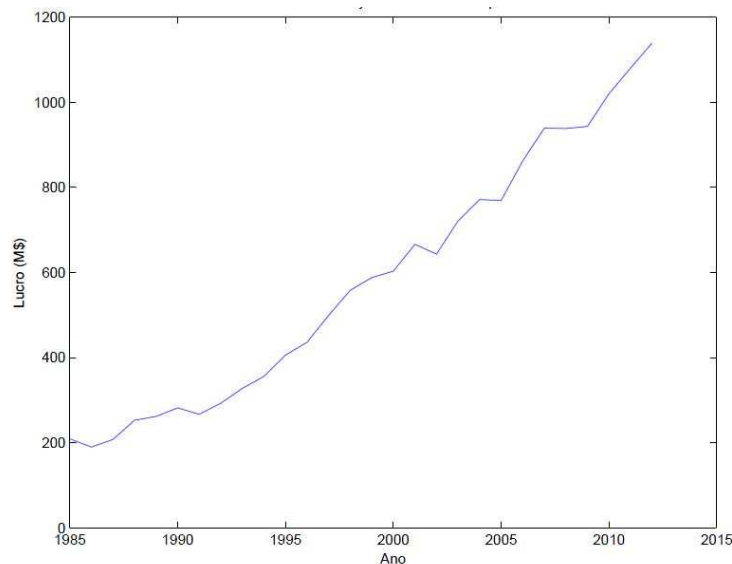


Figura 1.1: Gráfico dos lucros na *Broadway* desde 1985 até ao presente.[2]

Para se ter uma pequena ideia, a *Broadway* está a tornar-se cada vez mais, uma parte

indispensável do crescimento económico de Nova Iorque. Segundo o último relatório da *Broadway's League* que foi lançado a 5 de Junho do presente ano, a indústria contribuiu com 11200 milhões de dólares para a economia da cidade durante a temporada 2010/11, o que representa um aumento de 9 pontos percentuais em relação ao último ano em que há dados disponíveis, ou seja, 2008/09. Na melhor época da história da Broadway, no que diz respeito a lucros, estiveram envolvidos 86 mil empregos e gerou mais de 550 milhões de dólares só em impostos para a cidade.[7]

A Indústria do Entretenimento em geral, imagina-se que tenha um valor total de 449 mil milhões de dólares e cresceu 66% de 1998 a 2010.[15, 16]

1.1 Contextualização em engenharia

A complexidade duma coreografia, aliada às velocidades e forças associadas, tornam indispensável o uso de sistemas automatizados potentes, já largamente desenvolvidos e que representam um acréscimo dos níveis de segurança face aos mecanismos manuais. A tecnologia utilizada no entretenimento moderno necessita de um poderoso conjunto de ferramentas que se estendem para além das artes tradicionais do espectáculo e que incluem uma ampla variedade de locais, ferramentas e máquinas para automação e controlo.[12] Por exemplo num teatro, o movimento do cenário poderá ser visto como um exercício de movimento mecânico. Não obstante, qualquer efeito tecnológico levado a cabo que seja perceptível à audiência é, efectivamente menos satisfatório, já que a atenção do público será afectada. Por este motivo, toda a coreografia e movimento de objectos ou pessoas deverá ser cuidadosamente estudada e planeada de forma a que os componentes mecânicos envolvidos, estejam fora do alcance da visão da audiência, como se pode ver na figura 1.2.

Os efeitos poderão variar desde um simples fechar de porta através de um cilindro pneumático, até um sistema complexo de guinchos que fazem com o que um artista ou um candeeiro com toneladas de peso se movimentem por cima da audiência.[32]

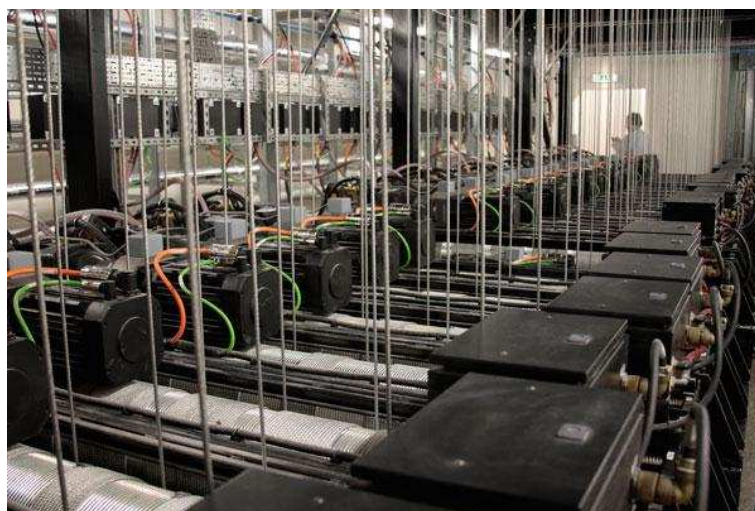


Figura 1.2: Componentes mecânicos existentes em espectáculos invisíveis à audiência.[4]

1.2 Automação no espectáculo

A automação no espectáculo começou a ser utilizada para a substituição do esforço humano. Assim, facilita tarefas operacionais em locais ocupados, reduzindo o trabalho técnico e esforço manual exigido, realizando mais facilmente a visão criativa da equipa de direcção. Poder-se-á, deste modo, aumentar a variedade de movimentos em palco produzindo um factor de surpresa muito maior para a audiência - factor *wow*.

Antigamente a maquinaria era apenas utilizada em locais de grande dimensão, com pouca exigência e sistemas de controlo modestos. Para além disso, era intuitivamente fácil de entender e grande parte da tecnologia era fácil de aprender com prática e sem grande estudo. Com o desenvolvimento da área, hoje em dia podem encontrar-se ferramentas extremamente potentes que, claro, trazem um custo e complexidade adjacentes. Em alguns espectáculos, o cenário pode ser tridimensional em vez do pano de fundo convencional. Tais cenários são suspensos por unidades individuais de suspensões servo actuadas, dispostos a apoiar, em muitos casos, uma estrutura de grandes dimensões e frágil. Nos sistemas modernos há uma grande variedade de controladores computadorizados e sofisticados invisivelmente colocados no interior de um equipamento que poderá ser encontrado nas instalações onde o espectáculo irá decorrer.[12, 32]

Nos espectáculos, a automação abrange o controlo de um vasto número de equipamentos móveis e poderão ser divididos em duas categorias distintas: maquinaria que se encontra debaixo do palco e a que se encontra acima do palco. [8]

1.2.1 Maquinaria debaixo do palco

A maquinaria existente debaixo do palco é, sem duvida, a mais desenvolvida na indústria, já que foi a primeira a ser utilizada e desenvolvida há muitos anos atrás. Elevadores - figura 1.3 -, palcos giratórios ou mesmo deslizantes, entre muitos outros elementos podem ser encontrados por debaixo de palcos quando o espectáculo assim o exige. Este tipo de mecanismos é bastante perigoso, independentemente de os sistemas utilizados normalmente serem de grandes dimensões. Pode-se imaginar o perigo que o actor corre durante a sua actuação aquando da abertura de um fosso no palco caso haja um imprevisto e que provoque a sua queda durante um *blackout*. Não será de admirar que durante a história dos espectáculos em palcos tenham ocorrido alguns acidentes graves.[8, 3]



Figura 1.3: Elevador de um palco.[26]

1.2.2 Maquinaria acima do palco

A maquinaria que se poderá encontrar acima do palco é cada vez mais importante no sucesso de uma produção e, pôde-se assistir, nos últimos anos, a um desenvolvimento exponencial destes mecanismos que apareceram posteriormente aos que existiam debaixo do palco. Isto deve-se à maior necessidade das empresas de produção de espectáculos quererem controlar de maneira mais eficiente as cenas de levantamento e de de voo de objectos que se encontram no palco ou mesmo de pessoas. Um espectáculo torna-se mais emocionante e o factor *wow* amplia-se caso haja pessoas ou peças de cenário, tais como barcos a voar sobre uma audiência- figura 1.4 . Tudo isto é possível devido ao desenvolvimento da automação nos palcos que trouxe a capacidade de alcançar consideravelmente as vantagens mecânicas, como por exemplo, fazer mover um objecto com muito peso a alta velocidade e fazer com que ele seja pousado numa posição precisa tal como operador consegue posicionar o cursor do rato no computador.



Figura 1.4: Barco no *Cirque du Soleil* a voar sobre o palco.[19]

Para além de todos os mecanismos anteriormente mencionados, o sistema de luzes e por vezes o de som encontra-se colocado acima do palco acoplado em estruturas reticuladas , como se pode ver na figura 1.5, existindo um número infinito de formatos.



Figura 1.5: Sistema de luzes instalada em barras de aço acima do palco.[18]

Capítulo 2

Objectivos

Os sistemas automatizados na Indústria do Entretenimento são relativamente recentes, fazendo com que a existência de empresas dedicadas aos espectáculos ainda não seja muito variada, aumentando assim o preço dos orçamentos. Existem poucas empresas que satisfaçam as propostas criativas de um director, uma vez que estas tecnologias são, provavelmente, a disciplina menos padronizada de espectáculo para espectáculo. Os métodos e equipamentos são muito diferentes de local para local e espera-se que esta situação mude com o envolvimento de mais fabricantes no mundo.

Os sistemas utilizados nos palcos estão intimamente relacionados com os sistemas utilizados na indústria - robôs, elevadores, guindastes, etc - partilhando muito equipamento.

Após ser efectuado um estudo aprofundado do que o mercado oferece, pretende-se com este trabalho desenvolver um sistema mais económico utilizando mecanismos disponíveis e padronizados, que se possa tornar numa opção viável. É então objectivo deste projecto, a conceptualização de um sistema de rotação que poderá ser anexado a um sistema de voo para que possa existir mais um grau de liberdade no sistema - figura 2.1.

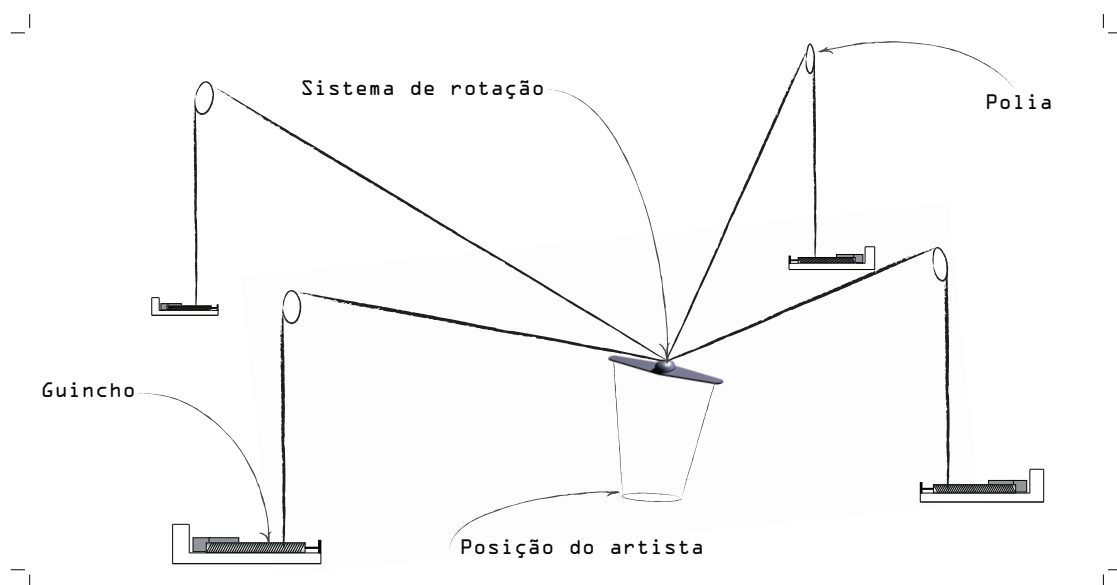


Figura 2.1: Esquema do modelo em 3D a desenvolver.

É igualmente objectivo desta dissertação, desenvolver programas no *software* de cálculo matemático desenvolvido pela empresa *MathWorks*, o Matlab[®] R2010b, para estudar o comportamento cinemático e dinâmico do sistema de voo durante uma trajectória definida.[17]

Esta tese será dividida em quatro partes: na primeira parte tratar-se-á de rever o estado da arte; na segunda parte apresentar-se-á a conceptualização de um sistema de rotação para acoplar ao sistema de voo; e ainda duas partes de dimensionamento do sistema de voo, em 2 e 3D.

Capítulo 3

Revisão do Estado da Arte

Os sistemas de voo são, cada vez mais, maquinaria de extrema importância para o sucesso de um espectáculo na Indústria do Entretenimento. Este tipo de sistemas é usado principalmente na Indústria Cinematográfica e teatros musicais que são usados para fazer levantar qualquer objecto do palco e transportá-lo para outro sítio, ou mesmo fazer entrar em cena um actor através de um voo com uma trajectória inicialmente planeada. Com um sistema de voo, poder-se-á aumentar substancialmente o factor *wow* de uma plateia uma vez que tudo dependerá da imaginação do encenador para fazer voar o que quer que seja por cima da audiência.

Tanto a elevação de objectos como o voo de pessoas é efectuada por meio de dispositivos de elevação mecânica que englobam dois grupos: os manuais e os motorizados.

3.1 Sistemas de voo manuais

Os sistemas manuais eram utilizados antigamente e encontram-se, nos dias de hoje, quase em vias de extinção devido às suas limitações. Este grupo pode ainda ser dividido em dois sub-grupos: modelo simples de conjunto de cordas e modelo de cordas com contrapeso.

3.1.1 Modelo simples de conjunto de cordas

O primeiro sistema de voo que foi inventado e utilizado é conhecido por sistema de mão ou sistema de cânhamo tendo ficado conhecido por este nome, devido ao tipo de corda utilizada. A corda era constituída com fibras que se obtêm da planta *cannabis* e é extremamente resistente à tracção.[10] Normalmente havia três roldanas por onde passavam três cordas (esse número aumentou substancialmente durante os anos) e que são impedidas de se movimentarem através de um trilho que se encontrava atrás do palco e onde as cordas poderiam ser presas como se pode ver na figura 3.1.

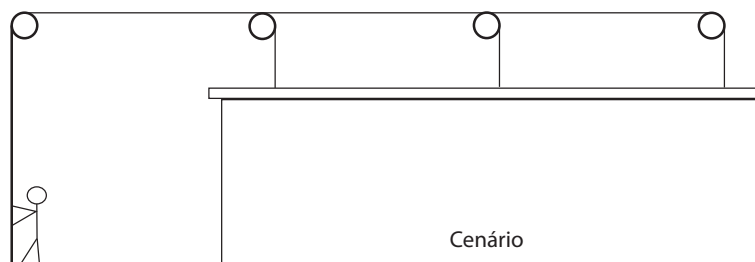


Figura 3.1: Esquema do modelo manual simples de conjunto de cordas.

Para a fixação definitiva de algum objecto que deveria ficar suspenso acima do palco usavam-se pinos para amarrar as cordas. Era desta forma que os objectos eram levantados do palco e as pessoas encarregadas pelo puxar das cordas, tinham de ser efectivamente muito fortes e bastante pesadas para que fossem capazes de levantar objectos com bastante peso. Passado algum tempo, para facilitar a vida do operador, aumentou-se o número de polias para uma desmutiplicação da força e assim, o operador teria de efectuar menos força para o levantamento do mesmo objecto. Este tipo de sistema arcaico é extremamente perigoso uma vez que se uma corda se solta das mãos do operador, o objecto cai no palco e, aquando da sua queda, poderá causar danos graves no objecto, no palco, causar lesões aos actores ou até mesmo a morte, dependendo das circunstâncias.[8, 3]

3.1.2 Modelo de cordas com contrapeso

Foi desenvolvido na primeira metade do séc. XX e trata-se do sistema de voo mais comum utilizado nos espectáculos. É possível criar efeitos fantásticos pelo uso hábil de contrapesos durante uma *performance* ao vivo, contribuindo para a apreciação e entusiasmo de milhões de espectadores ao longo dos anos.[3]

Na figura 3.2 pode verificar-se que os princípios do modelo simples de conjunto de cordas podem igualmente ser encontrados no sistema de contrapeso. São sistemas mais económicos ao nível de compra e instalação, mais fáceis de operar e oferecem capacidades de desempenho versátil. O manuseio deste tipo de sistemas depende do equilíbrio correcto da carga com pesos de aço para o contrabalanceamento do objecto que será necessário movimentar. Isto requer pessoas qualificadas para o cargo, já que possuem grande responsabilidade. Um operador experiente, poderá produzir velocidade de movimento que variam desde o subtil ao dramático para o atendimento às necessidades do desempenho em palco. Mediante a experiência, um operador poderá sentir qualquer alteração da carga ou obstrução dela e tomar decisões correctivas no movimento do objecto. Assim, um operador treinado poderá produzir efeitos altamente originais e diferentes que vão além da tecnologia, colocando a arte do improviso ao serviço espectáculo.[3, 11]

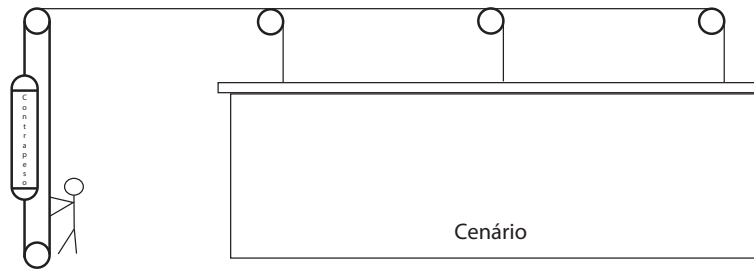


Figura 3.2: Esquema do modelo manual de cordas com contrapeso.

3.2 Sistemas de voo motorizados

Os sistemas de voo motorizados estão a tornar-se cada vez mais populares em novas instalações, desde escolas a casas de Ópera. Os equipamentos motorizados utilizados nestes casos, tratam do levantamento integral de todo o peso do objecto sem a necessidade de contrapesos, eliminando assim, a necessidade de manter sistemas equilibrados e as preocupações de segurança que advêm com os conjuntos indevidamente calibrados - figura 3.3. Estes mecanismos são controlados por sistemas de controlo que vão desde painéis com simples botões de pressão até sistemas computarizados com a capacidade de reproduzir trajectórias previamente gravadas.[8, 11]

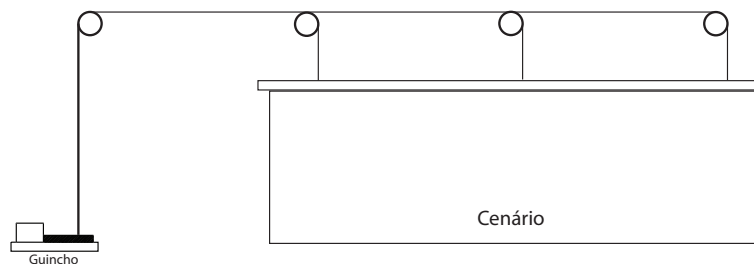


Figura 3.3: Esquema de levantamento de objectos motorizado.

A automatização dos sistemas de voo trouxe a capacidade de execução de movimentos de vários objectos e pessoas nos espectáculos e com movimentos diferenciados em simultâneo. Como se poderá imaginar, o processo poderia ser extremamente complicado e confuso se tentado manualmente. Os guinchos são um bom exemplo para a multiplicidade de aplicações num espectáculo, como se poderá verificar mais à frente neste trabalho. Com a utilização deste equipamento e devido à sua capacidade de elevação, não haverá virtualmente limites para o tipo de cargas a serem movidas. Os objectos poderão ser muito mais pesados e poderão movimentar-se a uma maior velocidade já que as limitações das capacidade de um ser humano não estarão em causa.[11]

No passado verificava-se a construção de pequenas quantidades de guinchos, o que resultava em custos elevados. Assim, com os recentes avanços no desenvolvimento e produção de guinchos têm reduzido significativamente o custo dos sistemas motorizados, sendo que nos dias de hoje, são produzidos em massa e tornaram-se num produto bem mais acessível atendendo às necessidades. Ainda assim, comparando com os custos dos

sistemas manuais de contrapeso, estes sistemas motorizados ainda podem ser consideravelmente mais caros de instalar e de manter. Não obstante,

“Manual counterweight sets are going up in price and automotive/powerflying system prices are coming down. Cost of manual flying is seen in terms of rigging system only and not the building infrastructure, which has to take double the load with the counterweight system. These costs are not reflected in current comparison between the two alternatives. LEN AUERBACH, [8]”

ou seja, o custo da automatização está a baixar enquanto que os custos dos sistemas manuais estão a aumentar e, no último caso, verifica-se que o que rodeia o sistema não se reflete nos custos finais. Este caso devia ser tomado em conta já que a infraestrutura sofre o dobro da carga com um sistema de contrapeso.

3.3 Componentes de elevação motorizados

Diferentes tipos de componentes podem ser encontrados nos espectáculos para a elevação de objectos e pessoas. No entanto, os guinchos serão o melhor exemplo para a multiplicidade de aplicações onde podem ser utilizados. Virtualmente, todo o levantamento de cenários e pessoas é efectuado por este tipo de componente. Não obstante, no passado cada guincho era desenhado para uma aplicação personalizada enquanto que nos dias de hoje isso já não é necessário nem corrente devido à existência de um elevado número de fabricantes oferecendo um variadíssimo leque de opções padrão. Claro que ainda é possível personalizar um guincho para uma dada aplicação, caso isso seja necessário, mas isso trará custos acrescidos. O uso de guinchos standardizados traz, efectivamente, benefícios: redução nos custos de projecto e manutenção, menor tempo de entrega de material e a maior certeza de que o guincho vai funcionar de forma segura e fiável.[8, 11]

3.3.1 Guinchos

Um guincho consiste num parafuso sem fim onde poderão ser enroladas uma ou mais cordas/cabos - normalmente cabos de aço. De uma forma muito simples, o parafuso sem fim encontra-se ligado a um motor eléctrico através de uma caixa de velocidades. Existem já empresas que produzem guinchos em que o motor está ligado directamente ao parafuso sem fim, sem a necessidade do uso de uma caixa de velocidades.[8] De salientar que existe um número mínimo de componentes para se construir virtualmente um guincho básico: um motor eléctrico que normalmente tem um travão associado, um redutor, um veio associado e uma chumaceira de apoio. Por vezes há também um redutor de velocidade por corrente de elos. Ainda há inúmeros componentes que podem ser montados num guincho, desde sensores de movimento, um travão externo e independente, um tipo de mecanismo para garantir a tensão nos cabos, entre outros. Dada esta pequena lista de componentes, existe uma grande variedade de *designs* que foram criados para serem usados nos espectáculos. Os pontos seguintes necessitam de ser avaliados antes da escolha de um guincho:[8, 11, 9]

- Força de tracção - a força máxima que o guincho terá de exercer sobre os cabos dependerá do peso a levantar. Em teatro pode variar entre os 50-2500kg; Para o caso de grandes cargas fixas (acima dos 1000kg) a utilização de guinchos assistidos

por contrapesos deverá ser, sempre que possível, uma opção a considerar para a redução do tamanho dos guinchos.

- Comprimento e tipo de cabo - depende do tipo de aplicação;
- Velocidade:
 - Velocidade fixa - este tipo de guincho é usado para o caso das cargas serem muito pesadas e necessidade de movimento imperceptível para uma plateia. Como exemplo, se for necessário mover um candeeiro de tecto numa Opera, poderá ser a uma velocidade tão baixa como um metro por minuto. Tentar movimentar este sistema de iluminação a uma velocidade superior, com um guincho de velocidade fixa, iria resultar em arranques e paragens o que poderia ser demasiado abrupto para o efeito da iluminação.
 - Velocidade variável - a enorme variedade de velocidades possíveis com o uso de guinchos de velocidade variável torna-se ideal para o caso de voos de objectos/pessoas para um aumento do efeito *wow* na plateia. Um objecto que viaja a uma velocidade baixa poderá em instantes movimentar-se a uma velocidade estonteante, sendo que as velocidades máximas são, geralmente, ditadas pelos requisitos do utilizador. Não obstante, por motivos de segurança, utiliza-se uma velocidade até $15m.s^{-1}$ para aplicações de alta velocidade, como por exemplo, efeitos de câmara ou acrobacias de pessoas.

Todos os parâmetros acima referidos servem para determinar o tamanho total, peso e tipo do guincho a utilizar. Para o levantamento de objectos pesados são efectivamente necessários guinchos maiores e mais pesados. No passado, verificava-se que o peso do guincho e do objecto que seria necessário movimentar no ar era equivalente. Nos dias de hoje, graças ao seu desenvolvimento em soluções de projecto, pode verificar-se que o peso destes pode ser reduzido para dois terços do peso do objecto a ser movimentado.

Existem inúmeros modelos distintos de guinchos mas, neste trabalho apenas se apresentam dois tipos que diferem principalmente pela forma de como o cabo sai do tambor: guinchos tradicionais e os com ângulo de zero graus à saída do tambor.

3.3.1.1 *Fleet Angle VS Zero Fleet*

Com o enrolar e o desenrolar do cabo no tambor de um guincho, o ponto de saída do cabo em relação ao guincho move-se através do tambor, viajando de um lado para o outro. A distância deste movimento do ponto de saída depende do diâmetro do tambor, tal como a distância que o cabo tem de percorrer. Normalmente o cabo é desviado por um sistema de polias depois da saída do tambor. Num caso simples em que o guincho e a polia se encontram em posições fixas, pode verificar-se a alteração de ângulo que o cabo faz em relação à primeira polia devido ao movimento lateral do seu ponto de saída no tambor - figura 3.4a . Este ângulo é conhecido como *fleet angle* e dois graus será o seu máximo valor para que haja segurança e, assim, este ângulo define a distância da primeira polia em relação ao guincho para que o este ângulo possa ser minimizado. Para tentar superar este problema, houve um desenvolvimento no projecto de guinchos afim de compensar a variação do ponto de saída da corda no tambor. Estes novos mecanismos são conhecidos como dispositivos de *zero fleet* e permitem uma maior liberdade na montagem do guincho

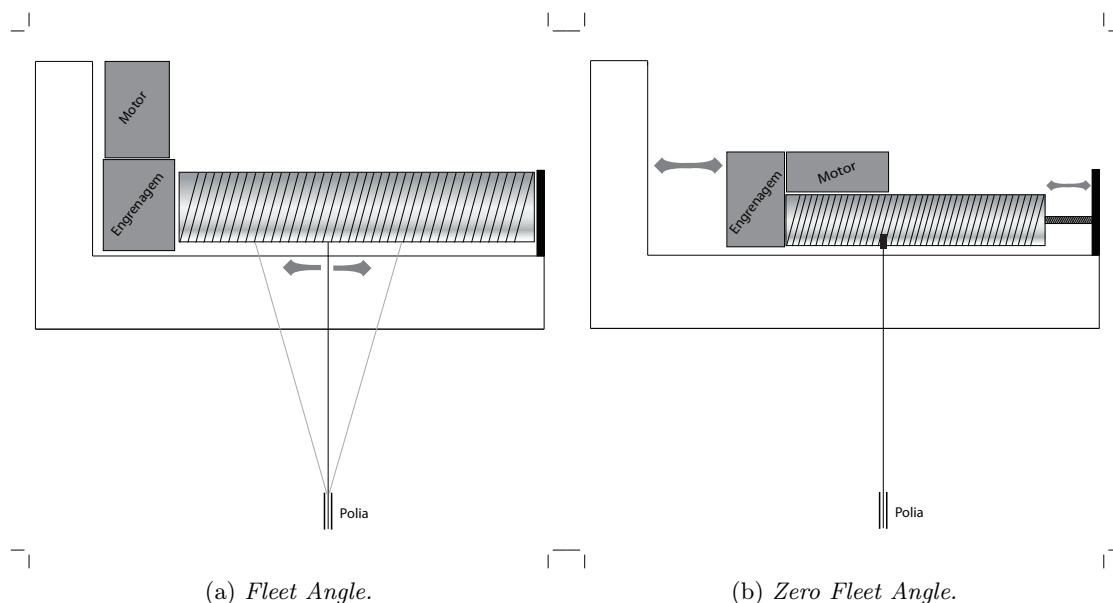


Figura 3.4: *Fleet Angle VS Zero Fleet Angle.*

e das polias. O mecanismo *zero fleet* é conseguido com o movimento lateral do tambor do guincho ou pela existência de uma polia que segue o movimento do ponto de saída da corda - figura 3.4b. Este tipo de guincho é ideal para espaços reduzidos já que não necessita de ser colocada uma polia a uma distância considerável.[8, 9]

3.3.1.2 Travões de Guinchos

Os guinchos, por razões de segurança quando movimentam pessoas ou cenário, terão de ter acoplados dois travões independentes. Alguns fabricantes montam um travão no veio de transmissão e outro no lado do tambor para atenuar alguma falha da caixa de velocidades; outros fabricantes montam ambos os travões no veio de accionamento na entrada da caixa de velocidades; enquanto que outros fabricantes usam apenas um travão no guincho, não se tratando de uma prática corrente com excepção para guinchos que tenham de puxar algo na horizontal sobre o palco. Caso o palco tenha alguma inclinação sobre o público, isto já não se aplica porque em caso de falha, o objecto poderá rolar sobre a audiência e causar danos.[9]

3.3.1.3 Motores

Motores eléctricos são construídos em inúmeras configurações, tamanhos e estilos para cobrir todas as necessidades. Nesta secção serão abordados os três tipos de motores eléctricos mais comuns usados em guinchos: Motores DC, AC e Servomotores AC. Todos estes tipos de motores convertem energia eléctrica em força mecânica através da interacção de forças magnéticas.

Motores DC

Os motores DC dominaram o mercado na maquinaria de espectáculos por muitos anos uma vez que o controlo de velocidade deste tipo de motores ser relativamente simples e pouco dispendiosa e, fornece binário alto mesmo a velocidades baixas.

Ao longo dos últimos anos, os motores DC têm caído em desuso, não só em automação de espectáculos mas também, e com maior importância, nas indústrias. Como resultado dessa redução de uso, tem-se notado uma enorme dificuldade em comprar unidades eléctricas DC sendo que este tipo de sistema está a ser progressivamente eliminado. Para termo de comparação, hoje em dia, o custo de um motor DC de íman permanente com 3cv custa, aproximadamente, cinco vezes mais do que o equivalente motor AC.[8, 1]

Motores AC

Os motores de indução AC trifásicos são o tipo de motores mais utilizados devido ao seu preço, disponibilidade, extrema fiabilidade e exigir pouca manutenção quando usados normalmente. Estes motores trifásicos podem fornecer elevado binário em toda a sua faixa de rotação, inversões suaves e desempenho silencioso quando combinados com accionamentos de motores eléctricos apropriados. A suavidade e a disponibilidade de binário mesmo a baixas rotações é extremamente importante no mundo do espectáculo uma vez que um movimento lento poderá ser necessário para qualquer efeito.

A chegada dos motores AC coincidindo com a evolução da computação poderá dizer-se que foi efectivamente o início da era da automação nos espectáculos, tal como é conhecida no presente. O desenvolvimento de sistemas de controlo multi-eixo para o manuseamento de materiais e embalagens nas indústrias foi o início da automação acessível e pode ver-se todo o tipo de controladores multi-eixo, por exemplo, em linhas de produção de alimentos. Posteriormente aos simples sistemas de controlo foram integrados os controladores de posicionamento em accionamentos de velocidade variável.

O equipamento utilizado em espectáculos varia conforme a necessidade, usando-se motores de altas Voltagens para bombas hidráulicas de alta potência em parques temáticos.[8, 1]

Servomotores AC

Os servomotores são uma classe muito especial de motores que são seleccionados para tarefas que necessitem alta precisão no posicionamento, desempenho excepcional e inversões rápidas, ou seja, é um motor que necessite de uma resposta instantânea a um dado pedido - por exemplo, aceleração e desaceleração. Este tipo de motores são fabricados, normalmente, com um *revolver* montado no seu eixo - para detalhe do posicionamento - e um accionamento específico para o seu controlo.

Os servomotores AC fornecem um *ratio* potência/tamanho comparativamente superior ao de outros motores. Este tipo de motores não está de acordo com os mesmos padrões de configuração e montagem como os típicos motores DC/AC fazendo com que o preço destes servomotores e servocontroladores seja, efectivamente mais elevado.[8, 1]

3.4 Voo de artistas

Os avanços nos sistemas e *software* de controlo fizeram com que o voo de artistas em espectáculos fosse possível. Existem *softwares* sofisticados dedicados apenas para este tipo de voo conseguindo efectuar movimentos extremamente complexos desde uma até às três dimensões tanto para os *performers* como para objectos com que eles tenham de interagir. Tudo isto poderá ser feito em espaço aberto e com processos repetidos uma vez que as coreografias poderão ser simuladas no *software* e depois de gravadas, poderão ser repetidas com alta precisão o número de vezes necessárias. A simulação destes movimentos pode ser feita de forma *offline*, um avanço que trás uma grande poupança no tempo de ensaio que é extremamente valioso na preparação dos espectáculos. Os artistas podem então ser movidos com trajectórias cada vez mais complexas, com velocidades mais altas mas sempre com segurança, devido às inovações contínuas nos sistemas de automação.[3]

O movimento de artistas em sistemas de voo é uma forma extremamente eficaz de agregar expressividade visual para um espectáculo e aumenta exponencialmente o efeito de *wow*. O tipo de sistemas que permite estes voos trouxe novas opções criativas para os directores de um *show*. Como já referido anteriormente, voos automatizados de artistas fornece precisão e repetibilidade que não podem ser encontrados em sistemas equivalentes manuais. Os movimentos poderão ser coreografados e sincronizados perfeitamente com outros artistas voadores ou mesmo cenário.[9]

Existem três tipos de configurações de sistemas de voo que estão disponíveis para espectáculos, dependendo do orçamento da produção e do efeito desejado: sistemas com voos 1, 2 e 3D.

3.4.1 Sistema de voo 1D

O sistema de voo 1D é utilizado sempre que se necessite apenas de um voo vertical, ou seja, com a necessidade de movimentação do artista apenas para cima e para baixo. Este tipo de movimento é conseguido com a instalação de apenas um guincho - figura 3.5. Porém, um movimento vertical simples poderá ser considerado aborrecido e, para chamar a atenção da plateia poderá efectuar-se um efeito com um movimento pendular. Esta técnica depende totalmente da capacidade do artista, não havendo qualquer sistema que se encarregue de tal feito.

Esta técnica é utilizada maioritariamente por acrobatas aéreos onde estes são hasteados na posição a realizar o seu acto com suspensão adicional fornecida por longas sedas, arcos ou mesmo cordas, dependendo da rotina e da especialidade do artista. Por vezes dois acrobatas poderão encontra-se hasteados num único guincho e, se o movimento pendular for necessário para uma coreografia, no início do treino aconselha-se a utilização de sacos de areia com o peso equivalente ao do acrobata para se estimar a força necessária para que a trajectória seja possível de se efectuar em segurança.[8]

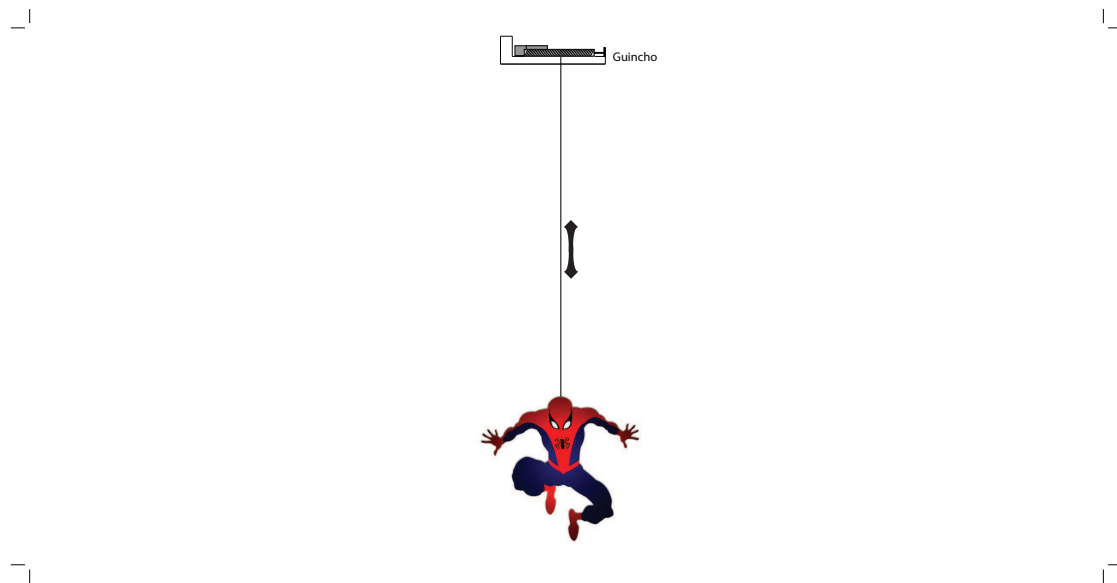


Figura 3.5: Esquema de um voo numa dimensão.

3.4.2 Sistema de voo 2D

Existem dois tipos de técnicas para que um sistema de voo 2D seja possível: um guincho com carrinho ou dois guinchos fixos.

3.4.2.1 Um guincho com carrinho

Este tipo de sistema consiste na existência de um guincho ou de uma polia que se movimenta horizontalmente num carro - figura 3.6 . Com ambos os movimentos, transversal do carrinho onde se encontra o guincho e com o enrolar e desenrolar do cabo (subida e descida do artista), poderá efectuar-se um movimento 2D.



Figura 3.6: Esquema de um voo em duas dimensões com um guincho num carrinho.

Este tipo de sistema não é o mais utilizado, mas trata-se de uma opção viável.[8]

3.4.2.2 Dois guinchos fixos

Este sistema é o mais utilizado caso se queira efectuar um efeito de voo 2D e consiste na instalação de dois guinchos fixos em posições definidas que estão ligados entre si para movimentar, efectuando-se o voo do artista - figura 3.7.

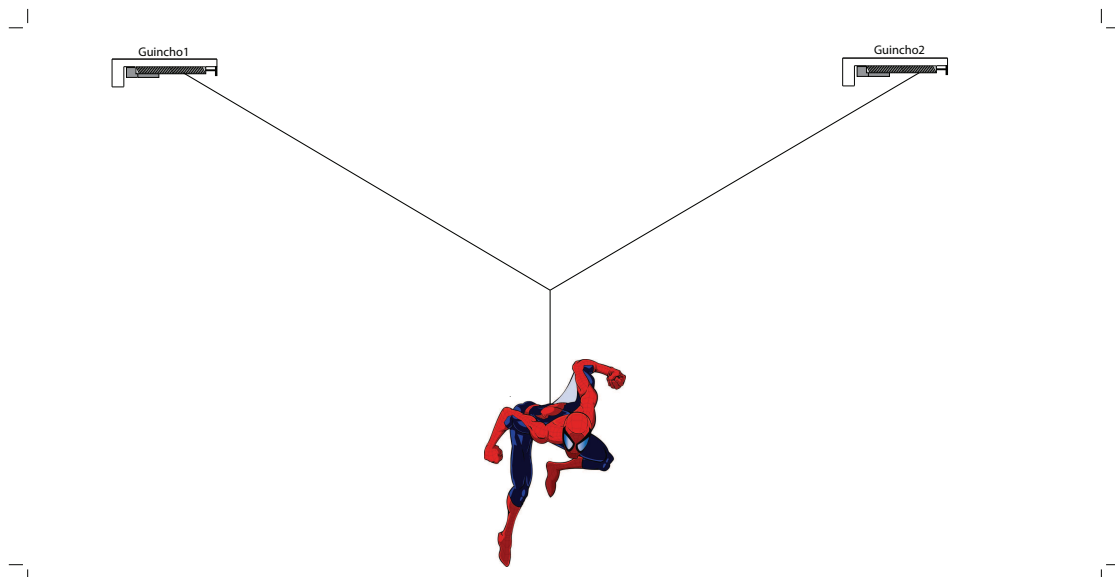


Figura 3.7: Esquema de um voo em 2D com dois guinchos fixos.

A maior vantagem que este sistema apresenta comparativamente com o sistema de um

guincho com carrinho é a não necessidade de um carrinho móvel, removendo a necessidade de construção de um mecanismo de engenharia extremamente complexo, especialmente quando se trata de um movimento com longas distâncias a percorrer ou mesmo em locais onde não é possível a sua instalação. Como os dois guinchos não precisam de estar colocados à mesma altura, este sistema é ideal para o caso da existência de obstáculos entre os dois mecanismos e também é uma excelente opção para fazer voar pessoas sobre uma audiência. Não obstante, existem igualmente algumas desvantagens no uso deste tipo de sistema: a existência de duas linhas ligadas ao *performer* torna o método de suspensão difícil de disfarçar; e quando as linhas se aproximam da horizontal, a tensão em cada cabo aumenta substancialmente - a trinta graus da horizontal, a tensão em cada cabo é equivalente ao peso do artista - o que limita a altura a que o artista pode ser puxado.[8]

3.4.3 Sistema de voo 3D

Para a criação de movimentos menos constrangidos e ainda mais entusiasmantes foram desenvolvidos os sistemas de voo 3D para que um actor possa voar para qualquer sítio num dado espaço. A cobertura total do volume que o *performer* poderá voar depende directamente do orçamento e do tipo de sistema utilizado; o custo e a complexidade do sistema aumenta proporcionalmente com o volume de espaço alocado para a trajectória de voo. Os sistemas de voo 3D têm vantagens e desvantagens similares aos sistemas de voo 2D como explicados anteriormente.[8]

Com a utilização de sistemas de voo 3D é necessário um *software* que dê capacidade ao utilizador para desenhar movimentos 3D suaves identificando um número conhecido de pontos de uma trajectória ou mesmo de um *loop* contínuo. A posição de um objecto pode igualmente ser registada em função do tempo e permitindo que o movimento seja ajustado facilmente caso seja necessário.

Dependendo da utilização que se pretende dar ao sistema voo, existem dois tipos de controlo possíveis: em tempo real ou em modo *offline*. O controlo em tempo real, permite ao utilizador controlar a posição do sistema de voo por intermédio de um ou dois *joysticks* e visualizá-la ao mesmo tempo com o movimento do sistema. Já no modo *offline*, o utilizador é responsável por criar uma trajetória *à priori* que será posteriormente reproduzida pelo sistema. Este último modo é usualmente utilizado para recriação de cenas coreografadas.

Neste trabalho apenas se apresentam duas técnicas para se efectuar um voo 3D uma vez que existem várias técnicas distintas: carrinho rotativo e múltiplos guinchos.

3.4.3.1 Carrinho rotativo

Em casos em que o director imagina efeitos específicos muito mais elaborados tais como a rotação de actores entre si durante uma trajectória de voo, os carrinhos rotativos serão necessários. Neste tipo de sistemas, o carrinho é constituído por um número variado de guinchos - normalmente entre dois e quatro - que rodam. O controlo dos guinchos - e por vezes do mecanismo de accionamento transversal - é montado sobre o carrinho e liga-se à mesa de controlo por uma ligação via rádio. A complexidade adicional deste tipo de sistema geralmente torna esta opção muito cara.[8]

A utilização deste tipo de sistema trás, igualmente, maiores responsabilidades de utilização devido à segurança dos actores. Em *The Beatles LOVE*, *Cirque du Soleil* em

Las Vegas - EUA, são utilizados nove carrinhos rotativos que possuem igualmente rodas montadas numa plataforma rotativa especialmente desenhados e desenvolvidos para este espectáculo. Ainda assim, St-Armor - responsável pelo desenvolvimento deste sistema admite que:

“It scares me a lot! I was much more afraid than the performers because they place all their trust in us. I have a huge responsibility and if I make any mistake the consequences could be fatal. When you see the blackbirds, for example, these people are flown from the winches on the trolleys from the grid, and sometimes the artists push off too hard from the ground and they can fly too close to one another with the potential danger of the wires entangling, so we have to manage the boundaries”.

quando se refere à segurança dos actores que executam os movimentos de voo.[14]

3.4.3.2 Múltiplos guinchos

O método mais simples e mais utilizado para representar voos 3D é o método dos múltiplos guinchos. Neste caso utiliza-se um determinado número deste tipo de mecanismo, 3 ou mais - 3.8 - que se encontram fixos e os quais se ligam, o mesmo número de cabos e guinchos, ao *performer* para a formar uma versão 3D equivalente ao sistema de dois guinchos fixos explicado anteriormente.

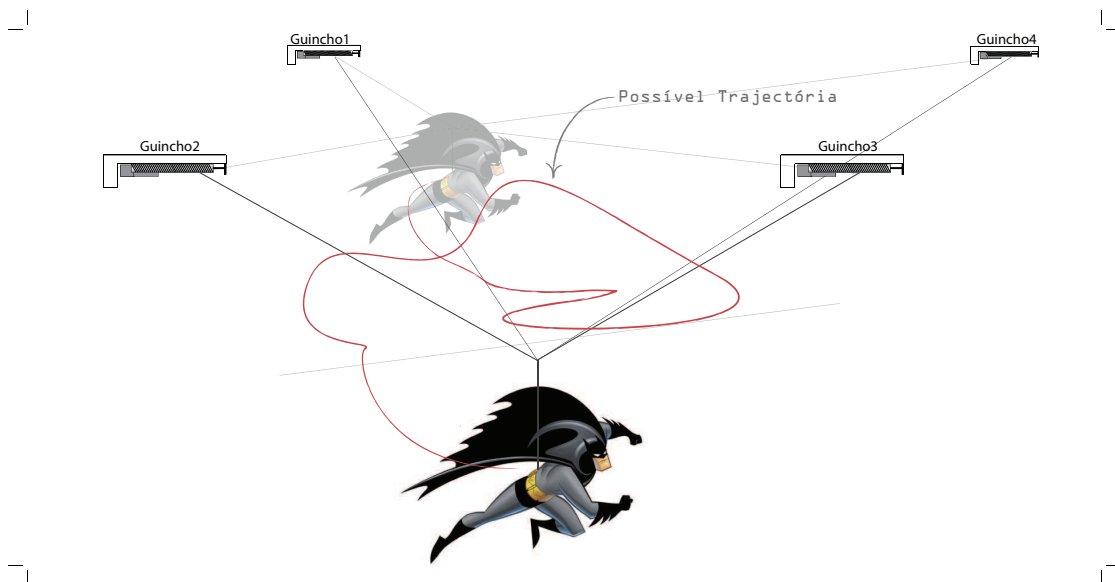


Figura 3.8: Esquema de um voo realizado tridimensionalmente e sua trajectória possível, efectuado através de quatro guinchos fixos.

Este tipo de sistema é utilizado desde concertos ao vivo, gravações de filmes, teatros musicais, etc. Na próxima secção apresentar-se-ão algumas das soluções existentes e com sucesso no mercado.[8, 9, 3]

3.5 Soluções existentes

Para a compreensão exaustiva das necessidades do mercado é de extrema importância uma revisão das soluções que este oferece ao consumidor e de que forma estas se desenvolveram. Numa área tão importante como a Indústria do Entretenimento e que movimenta tanto dinheiro na economia global, as empresas que desenvolvem estes sistemas tentam ao máximo esconder os seus projectos tentando estar sempre na vanguarda da evolução dos sistemas uma vez que, como o provérbio português assim o diz, “o segredo é a alma do negócio”.

3.5.1 *Spidercam*

Esta solução não se trata de um sistema de voo 3D para pessoas em espectáculos mas, trata-se de um excelente caso de estudo para este trabalho já que dá ao operador uma completa liberdade em todo o espaço fornecido . Trata-se de uma câmara suspensa por quatro cabos de Kevlar que se encontram ligados a quatro guinchos motorizados fixos em cada canto, para determinar a área coberta de voo. Encontra-se igualmente ligada por cabos de fibra óptica para que a imagem captada em directo possa ser transmitida em alta definição. O aspecto desta infraestrutura de filmagem, semelhante a um grande aracnídeo contribui para o popular nome comercial de *Spidercam*.

A *Spidercam* - figura 3.9 tem o objectivo de filmar ao vivo sobre uma área pré-determinada para captar os melhores momentos e é normalmente utilizada em eventos grandiosos de desporto, como futebol, críquete ou ténis e já provou o seu valor no mercado, fazendo parte de produções de renome mundial.



Figura 3.9: A câmara *Spidercam* em acção num evento de futebol.[6]

Na figura 3.9 pode-se ver a câmara montada numa estrutura que permite a rotação em dois eixos que são accionados automaticamente e remotamente pelo operador. Assim terá toda a liberdade de captar os melhores momentos ao vivo de um grande evento.[24, 23]

3.5.2 *r3 Rope Robot*

Este projecto não se insere no mundo da Indústria de Entretenimento mas é um excelente caso de estudo e de avanço tecnológico para a avaliação do sono nos humanos. O projecto *r3 Rope Robot* tem um dos sistemas mais avançados para efectuar o levantamento de um objecto, neste caso uma cama - figura 3.10. O levantamento da cama é efectuado por cordas guiadas sobre unidades de deflexão que são puxadas por guinchos motorizados para que a cama se possa mover para qualquer ponto do espaço definido. São utilizados guinchos modulares que permitem cargas até $100kg$ e velocidade máxima de $18ms^{-1}$.

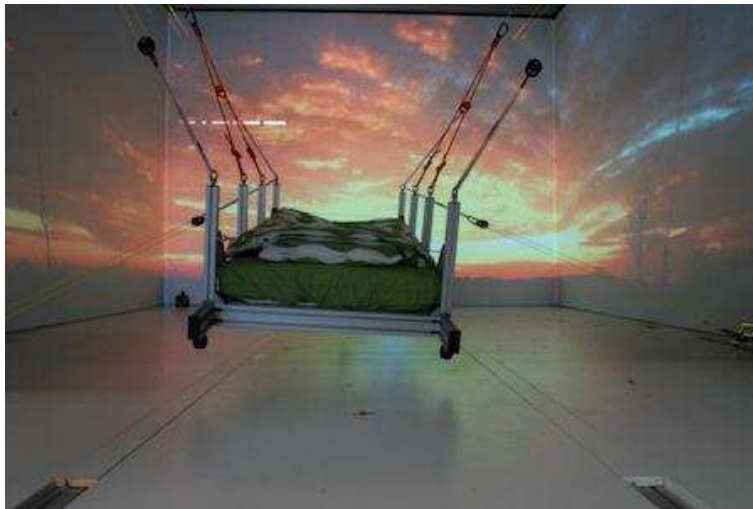


Figura 3.10: Cama suspensa por cabos e controlada pelo *r3 rope robot*. [30]

O *r3 Rope Robot* é constituído por sensores de movimento e hápticos e, com os codificadores de alta resolução existentes nos motores dos guinchos, combina toda a informação determinando a posição absoluta a cada instante. Cada corda possui igualmente um sensor de força com uma frequência de amostragem de $4kHz$ o que torna este sistema muito versátil.

Este projecto tem o nome de *Somnomat* e foi desenvolvido em Zurique, Suíça e teve como motivação o estudo do sono porque:

A child is rocked to sleep. Adults drowse in a rattling train. But why? Not much information about vestibular feedback on sleep is found in literature. Therefore, we want to investigate the underlying mechanisms by moving the test subject in different degrees of freedom while he/she is sleeping. [Joachim von Zitzewitz, chefe de pesquisa]

tornando este estudo extremamente inovador na área.

Este projecto tem implementado uma série de medidas de segurança dos quais se destaca os travões electromecânicos que estão instalados nos motores dos guinchos e que bloqueiam a sua rotação em caso de emergência. [30]

3.5.3 Lustre do *Phantom of the Opera* no teatro *The Venetian*

A peça mais sofisticada de equipamento de um teatro encontra-se em Las Vegas, no Teatro *The Venetian* para a produção de o Fantasma da Ópera e trata-se de um lustre. A empresa responsável pelo desenvolvimento e projecto deste marco é a *Fisher Technical Services (FTSI)*. O candelabro tem aproximadamente quatro metros de altura e cinco de largura em que as secções de iluminação são empilhadas umas em cima das outras, da mesma forma que um bolo de casamento, figura 3.11a . Este tipo de construção permite criar um efeito de iluminação total através dos seus quatro planos de iluminação horizontal independentes. Cada uma das quatro secções está ligada ao seu próprio conjunto de quatro cabos sendo que, cada cabo, é controlado por dois guinchos. Assim, todo o sistema é controlado por um total de trinta e dois guinchos que controlam a acção de dezasseis cabos. Todos estes sistemas permitem movimentar as quatro zonas do lustre separadamente, a sua velocidade e posição, figura 3.11b.



(a) Lustre completo.[20]

(b) Secções separadas próximas da plateia.[31]

Figura 3.11: Lustre no teatro *The Venetian*.

Para que o funcionamento da movimentação do lustre fosse viável foi necessário uma construção e reforço da cúpula do teatro. Esta foi construída com vinte toneladas de aço e quinze mil ligações aparafusadas. Existem ainda dezasseis faixas que servem de guia para o posicionamento do lustre através de carris - desenvolvidos para serem extremamente silenciosos - que estão instaladas desde a parte superior da estrutura até ao fim do tecto, sobre o público - figura 3.12 . A cúpula é constituída por duas curvaturas compostas e as faixas seguem essas formas complicadas. O sistema é extremamente complexo e para além de tudo o que foi já referido, cada faixa tem dois guinchos associados, um para controlar a posição do carril e outro para controlar um cabo que alimenta os rolos do guia do carril para determinar a posição de cada uma das quatro partes do candelabro.

O movimento do lustre, como anteriormente referido, é controlado por todos os guinchos a trabalharem simultaneamente e, a rotação do tambor de cada guincho para o enrolar e desenrolar dos cabos está encarregue por computadores independentes. Cada guincho tem um computador dedicado, não obstante, todos os computadores encontram-se ligados em rede com a interface do operador para que, caso alguma falha ocorra no sistema, as acções programadas para cada guincho sejam abortadas. O lustre pode ser controlado como peça única ou movimentando as quatro secções individualizadas para qualquer sítio que o operador decida. Como se pode imaginar, todos os cálculos

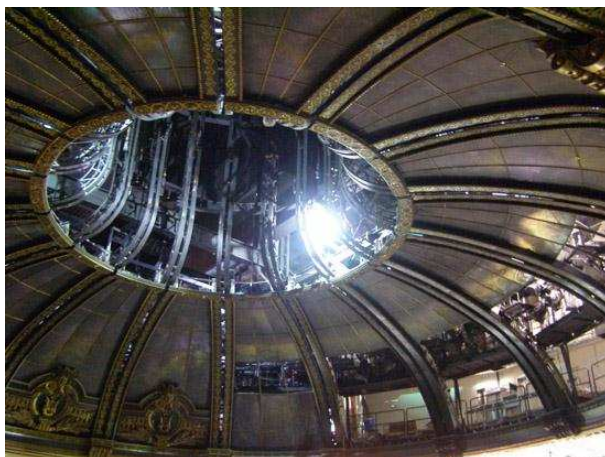


Figura 3.12: Guias e sua curvatura para o movimento do lustre num espaço 3D.[20]

matemáticos utilizados para a movimentação do lustre que está implícito no *software* possibilitando um movimento fluído, é incrivelmente complicado. Como exemplo desta complexidade, imagine-se que o operador deseja movimentar o candelabro no sentido descendente a uma velocidade constante de seis metros por segundo. Os guinchos necessitam de desenrolar os cabos à mesma velocidade mas, devido à curvatura da cúpula onde se movimentam os carris, isso não poderá acontecer. Para que o movimento a uma velocidade constante seja possível, os guinchos terão de desenrolar a velocidades diferentes, ora mais lentas nalgumas partes da curvatura ora mais rápidas noutras partes, a fim de alcançar a desejada velocidade constante de descida da iluminação, para a percepção da audiência. Esta mudança de velocidade dos guinchos tem de seguir perfeitamente a curvatura da cúpula de modo a tornar o movimento extremamente fluído.

Quando as quatro secções são movimentadas independentemente há o risco de colisão entre os cabos existentes no sistema. Assim, foram usados algoritmos extremamente complexos para que este problema fosse resolvido. Foram necessários numerosos doutorados e a sua genialidade de cálculo matemático para a criação desses algoritmos e, para que o *software* fosse desenvolvido elegantemente para que o processamento dos perfis de movimento pudesse ser realizado em minutos em vez de infindáveis horas.

Por razões de segurança, cada guincho instalado tem quatro vezes mais potência do que necessário para movimentar o lustre. Assim, o sobredimensionamento de todo o sistema tem um valor de quatrocentos pontos percentuais e um total de seiscentos e cinquenta cavalos permitindo que as quatro partes do candelabro sejam controladas por um único guincho, no caso improvável de três em cada quatro guinchos ou cabos falhem.

Toda a tecnologia por detrás do lustre seria um desperdício se não pudesse ser traduzido em efeitos surpreendentes para deslumbrar, assustar ou deixar derretida de emoções a plateia presente no teatro *The Venetian*. [20]

3.5.4 *Spider-Man: Turn Off the Dark*

O espectáculo *Spider-Man: Turn Off the Dark* em cena na *Broadway*, é simplesmente uma das maiores conquistas tecnológicas no que diz respeito ao desenvolvimento de novas

tecnologias e à engenharia meticulosa. Quase tudo o que existe neste musical foi pensado e desenvolvido para esta peça, desde as inúmeras mudanças estruturais do teatro, a coordenação complexa de sistemas de vídeo, som, iluminação e automação. Pode afirmar-se sem qualquer tipo de dúvidas que, a inovação das tecnologias desenvolvidas para o espectáculo do *Spider-Man* serão utilizadas em futuras produções.[21]

Este espectáculo é considerado a maior produção de sempre no que diz respeito a peças de teatro. Foram necessários sete anos de produção a um custo total de setenta e cinco milhões de Dólares. Não obstante, como anteriormente referido, tecnologia de topo desenvolvida para este espectáculo como, um sistema de voo revolucionário que permite sobrevoar o público - figura 3.13 , um sistema de automação cénica maciça traduz-se numa mistura alucinante de cenas tiradas directamente dos livros representada no palco. A imprensa local refere que o aspecto crucial desta produção gigantesca é o voo implementado, o que exigiu a coordenação de vários departamentos para que fosse possível trazer a história de quadrinhos para a realidade, no que diz respeito ao movimento dos actores nas sequências de voo. Pode considerar-se que o *Spider-Man: Turn Off the Dark* está para o teatro como o *Avatar* está para o cinema.[25]



Figura 3.13: Actores a voarem sobre a audiência numa cena de voo no espectáculo *Spider-Man: Turn Off the Dark*. [28]

A empresa *PRG* e a *Fisher Technical Services (FTSI)* ficaram responsáveis por fornecer e integrar todos os sistemas (iluminação, áudio, vídeo e automação) e desenvolver novas funcionalidades aos sistemas existentes, para incorporar permanentemente os novos produtos para futuras produções.[21]

De uma forma metafórica, todas as emoções sentidas por parte da audiência são mecanizadas, com a maioria delas decorrentes das deslumbrantes e emocionantes sequências de voo a uma velocidade estonteante dos actores sobre a plateia, sem qualquer precedente em qualquer parte do mundo.[22]

Em relação ao sistema de voo desenvolvido e ao espaço que pode ser percorrido, é facilmente explicado da seguinte forma: imagina-se uma sala cúbica com um guincho posicionado em cada canto superior da sala de onde saem os cabos directamente ligados ao actor. Pode-se ver então uma pessoa a voar no meio da sala com quatro cabos

a puxá-lo de um lado para o outro, manipulando apenas o enrolar e desenrolar dos cabos podendo percorrer-se qualquer ponto no espaço tridimensional. Assim, qualquer trajectória imaginada pelo encenador é possível de ser executada. Tudo foi importado de bons desenhos em AutoCAD 3D[®] para a realidade do teatro para que o sistema pudesse funcionar perfeitamente e ser executado da forma que os produtores imaginaram.

Os voos inovadores em cena no *Spider-Man* trouxeram grande desconfiância na segurança dos actores por parte das entidades responsáveis pela segurança dos mesmos. Não obstante, todo o sistema foi desenvolvido e cada mudança de posição e velocidade são monitorizados em tempo real e, caso haja qualquer falha a nível mecânico, ou seja, se qualquer guincho fica fora da posição ou velocidade (até $10ms^{-1}$) ou qualquer outro tipo de falha, todo o sistema é desligado não colocando em causa a segurança do actor. O sistema de controlo foi desenvolvido de tal forma que se o actor for mudado para outro que pese mais vinte quilogramas o programa emite uma janela de erro devido às apertadas restrições que foram efectuadas e que poderiam influenciar a posição, velocidade e aceleração.[25, 13]

Olhando para o *Spider-Man: Turn Off the Dark* é fácil perceber como os novos produtos, recursos, materiais e técnicas criadas para este musical revolucionário afectará a tecnologia utilizada no Teatro, tornando-se padrão de comparação para futuras produções e para a Indústria do Entretenimento ao vivo no seu todo. Como se trata de um nível sem precedente na integração de todos os sistemas automatizados na produção, pode considerar-se o arquétipo da engenharia no teatro.

Parte II

Métodos e Modelos

Capítulo 4

Desenvolvimento do sistema de rotação

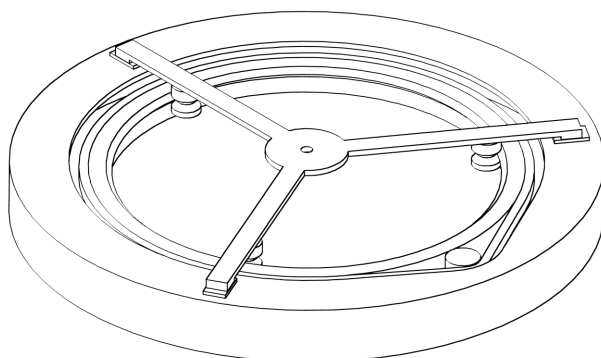
Os sistemas de rotação utilizados em mecanismos de simulação de voo, têm como função possibilitar a rotação segundo o eixo vertical, durante uma trajectória de voo. Assim, após o estudo minucioso do que o mercado oferece, verifica-se que estes sistemas são desenvolvidos exclusivamente para cada espetáculo, como é o caso do sistema utilizado na produção da Broadway, *Spiderman - Turn off the dark*.

Então, para o desenvolvimento deste que é o trabalho central desta dissertação, teve que se ter em conta, numa primeira fase, quais os requisitos necessários dum sistema deste tipo.

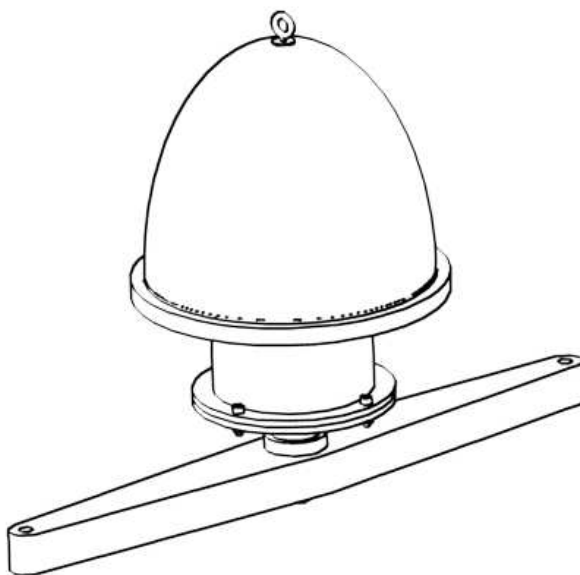
Uma vez que este é um sistema de rotação, ter-se-á que desenvolver um mecanismo que confira essa mesma rotação ao utilizador, tendo sempre em conta que esse movimento terá que ser controlado, fazendo parte de todo o efeito visual coreografado. Por outro lado, outro aspecto a ter em conta será o facto deste ser um dispositivo móvel que circula no espaço 3D, restringindo assim os possíveis meios de alimentação de sistemas eléctricos.

4.1 Desenvolvimento Conceptual

Uma vez que este é um sistema que tem em vista a sua inserção no mercado, é importante desenvolvê-lo também quanto ao seu conceito e *design*. Deste modo analisaram-se duas possibilidades: uma em forma de disco (Figura 4.1a) e outra em forma de pião (Figura 4.1b).



(a) Proposta de *design* em forma de disco para o sistema de rotação.



(b) Proposta de *design* em forma de pião para o sistema de rotação.






Figura 4.1: Comparação dos conceitos propostos para o sistema de rotação.

Deste modo, consoante a escolha dos sistemas constituintes do dispositivo de rotação, será então escolhido um destes conceitos para a solução final.

4.2 Desenvolvimento do sistema e análise morfológica

Para se chegar a uma solução tida como solução óptima, é necessário analisar diferentes sistemas. Procedeu-se então a uma análise morfológica de todo o sistema, de modo a escolher os mecanismos acertados tendo em conta as restrições do problema (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Análise morfológica do sistema de voo.

Mecanismo	Hipóteses	Esboço
Motor	Motor DC	
	Motor AC	
	Servomotor	
Transmissão	Correia	
	Veio directo	
Suporte	Argola	
	Disco	

Deste modo, escolheu-se utilizar no sistema de voo o motor DC pelo facto de ser bastante compacto e permitir ser alimentado por meio de baterias, algo essencial para um mecanismo móvel deste tipo, bem como pelo facto de ter um elevado binário a baixas rotações. Por outro lado, escolheu-se utilizar um veio directamente ligado ao redutor planetário do motor, uma vez que este sistema permite ter o seu centro de massa perfeitamente alinhado com o eixo vertical, o que evita que haja desequilíbrios. Teve ainda que se ter em conta que o centro do massa do conjunto motor/redutor não está alinhado com o eixo do veio, pelo que se colocaram as baterias num local que possibilitasse

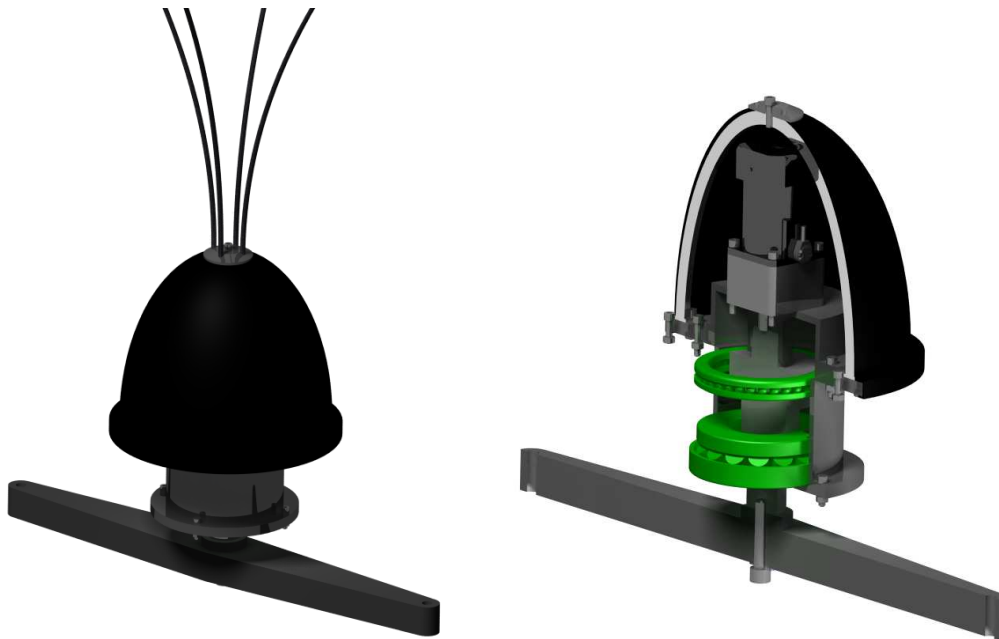
o equilíbrio do sistema.

Para a utilização do mecanismo de veio directamente ligado ao motor, teve que se ter em conta que além dos esforços radiais naturais dum sistema rotativo (que no caso não serão muito elevados dada a baixa velocidade angular para a qual o sistema foi projectado), existe ainda um grande esforço segundo o eixo de rotação, razão pela qual se decidiu utilizar um rolamento de rolos juntamente com um rolamento de esferas.

Já no que diz respeito ao modo como estão conectados os quatro cabos, que conferem movimento e suportam o dispositivo de voo, e o sistema em si, foi escolhido o sistema de disco, uma vez que este se apresentou como uma solução mais estável e segura.

4.3 Modelação 3D e Foto realismo

Uma vez analisados e escolhidos todos os sistemas constituintes do sistema de voo 3D, chegou-se a uma solução final, utilizando o desenho conceptual em forma de pião, tal como ilustrado na Figura 4.2, utilizando o *software* desenvolvido pela empresa *Dassault Systèmes*, o CATIA® V5 R19 em todo o processo de modelação.



(a) Sistema de voo proposto modelado em computador. (b) Sistema de voo proposto visto em corte.

Figura 4.2: Proposta de modelação CAD para o sistema de voo.

No entanto, é importante ver o impacto visual do sistema em ambiente real ainda antes da sua construção, de modo a que possíveis alterações que daí possam advir, sejam efectuadas sem o custo inerente ao desenvolvimento e construção de novos protótipos físicos. Para tal, fez-se um fotorrealismo, inserindo-se o sistema num cenário real (Figura 4.3).



Figura 4.3: Fotorrealismo do sistema de voo proposto.

Posto isto, uma vez definidos todos os constituintes do sistema de voo e modelado consoante todas as suas especificações e de acordo com o *design* escolhido, tem-se um modelo CAD final.

Capítulo 5

Dimensionamento 2D

Apesar deste trabalho tratar de uma hipótese de resolução de dimensionamento de um sistema de voo numa dimensão 3D, apresenta-se neste capítulo uma aproximação a um caso de um voo 2D para a introdução do tema bem como a modelação matemática tendo em vista o seu dimensionamento. A aproximação a este problema é efectuada de forma incremental.

5.1 Cinemática incremental 2D

Para o problema incremental é necessário definir uma trajectória e todos os dados iniciais do problema. Para um caso geral mas com uma trajectória de voo definida como a da figura 5.1, é preciso introduzir o comprimento total do palco (L) e a altura a que se encontram as polias (H); o comprimento (d) e altura máxima (h) atingida pelo voo para a trajectória definida e ainda o tempo total (t) do voo.

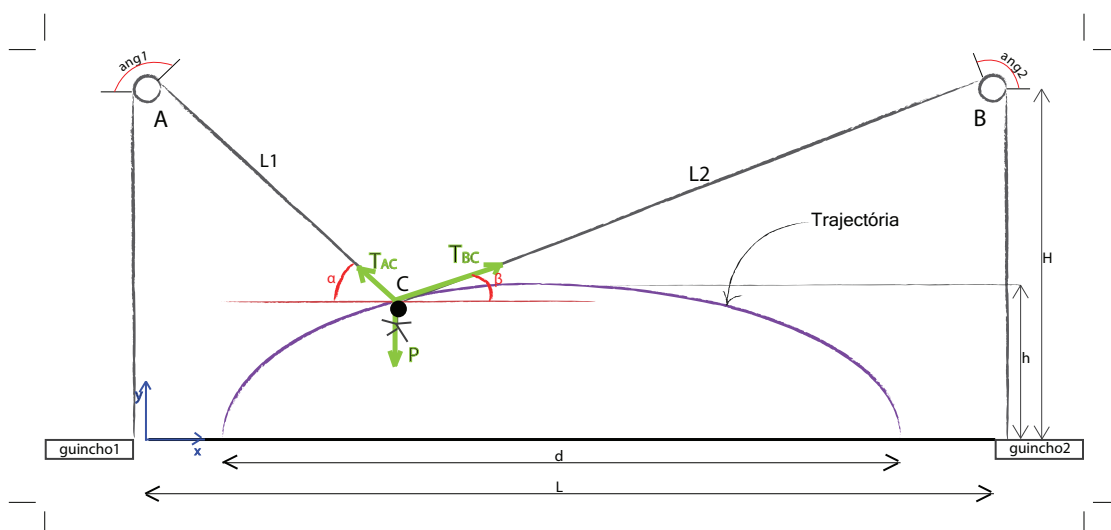


Figura 5.1: Esquema do voo 2D

No caso de estudo efectuado, utiliza-se um tempo de salto total de dez segundos

com mil incrementos para uma melhor aproximação à realidade. Um maior número de incrementos resulta numa melhor descrição da realidade, no entanto tal implica custos computacionais mais elevados, tendo que se encontrar uma situação de compromisso. Assim, para o caso de estudo efectuado os dados são: $t = 10[s]$ com mil incrementos; $L = 10[m]$; $H = 8[m]$; $d = 8[m]$; $h = 4[m]$;

Com todos os dados iniciais definidos, pode-se então definir a trajectória. Para este caso de estudo foram utilizadas as seguintes equações matemáticas paramétricas para definir a trajectória do voo:

$$\begin{cases} x_t = \left(1 - \cos\left(\pi \frac{t}{t_{max}}\right)\right) \frac{d}{2} + 1 \\ y_t = \frac{4h}{d} \left((x_t - 1) - \frac{1}{d}(x_t - 1)^2\right) \end{cases} [m] \quad (5.1)$$

Dada a trajectória definida pode-se proceder ao cálculo das velocidades e acelerações instantâneas diferenciadas para as componentes horizontal e vertical. Assim, como são utilizados incrementos ao longo do tempo podem-se determinar as variáveis para cada instante através das seguintes equações:

$$\begin{cases} V_{x_t} = \frac{x_{t+\Delta t} - x_t}{\Delta t} \\ A_{x_t} = \frac{V_{x_{t+\Delta t}} - V_{x_t}}{\Delta t} \\ V_{y_t} = \frac{y_{t+\Delta t} - y_t}{\Delta t} \\ A_{y_t} = \frac{V_{y_{t+\Delta t}} - V_{y_t}}{\Delta t} \end{cases} \quad (5.2)$$

Onde V_x e A_x são as componentes horizontais e V_y A_y as componentes verticais da velocidade e da aceleração instantânea, respectivamente. Findo este processo, podem-se então calcular as velocidade e acelerações absolutas, respectivamente, para cada instante através das seguintes equações:

$$\begin{cases} V_t = \sqrt{V_{x_t}^2 + V_{y_t}^2} \\ A_t = \sqrt{A_{x_t}^2 + A_{y_t}^2} \end{cases} \quad (5.3)$$

Pode-se então prosseguir com o processo de dimensionamento e para o passo seguinte no qual se trata de calcular o comprimento de cada cabo, existe a necessidade de calcular para cada instante o ângulo que cada um faz com a horizontal. Assim, para o cabo número um o ângulo é o α e para o cabo número dois o ângulo β , como se pode ver

no esquema da figura 6.2 no início deste capítulo. Assim, os ângulos são calculados da seguinte forma:

$$\begin{cases} \alpha_t = \tan^{-1}\left(\frac{H-y_t}{x_t}\right) \\ \beta_t = \tan^{-1}\left(\frac{H-y_t}{L-x_t}\right) \end{cases} [rad] \quad (5.4)$$

Ao saber-se o valor do ângulo que cada cabo faz com a horizontal em cada instante facilmente se pode calculará os comprimentos dos cabos através das seguintes equações:

$$\begin{cases} L1_t = \frac{x_t}{\cos(\alpha_t)} \\ L2_t = \frac{L-x_t}{\cos(\beta_t)} \end{cases} [m] \quad (5.5)$$

Este cálculo permite aferir o comprimento de cabo que terá de ser enrolado ou desenrolado no tambor do guincho para assegurar a trajectória desde a roldana até à posição requerida.

Findo este processo, o passo seguinte passa por calcular a tensão em cada cabo, para cada instante, resultante da força vertical imposta pelo peso total, ou seja, o peso do corpo do executante e do sistema de rotação. Assim, pode-se calcular a tensão em cada cabo pelo método do triângulo - figura 5.2 . Através deste método não existe a necessidade de efectuar um sistema de duas equações para encontrar as duas incógnitas das tensões nos cabos, ou seja, calcular o somatório das forças em cada eixo, $\sum F_x = 0$ e o $\sum F_y = 0$.

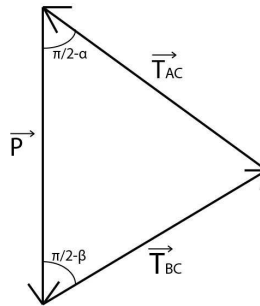


Figura 5.2: Método do triângulo.

As tensões T_{AC} e T_{BC} são facilmente calculadas, para cada instante, através das

seguintes equações:

$$\begin{cases} T_{AC_t} = \frac{P}{\sin(\alpha_t + \beta_t)} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_t\right) \\ T_{BC_t} = \frac{P}{\sin(\alpha_t + \beta_t)} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_t\right) \end{cases} [N] \quad (5.6)$$

em que $P = mg[N]$ e m é o peso total da pessoa e do sistema de rotação, em kg , enquanto que $g = 9.81ms^{-2}$, trata-se da aceleração gravitacional. O valor da força vertical exercida pelo peso não varia ao longo do tempo, ou seja, é constante.

Sabendo-se o valor da tensão exercida em cada cabo pela força vertical constante, poderá então prosseguir-se para o cálculo final de tensão dos cabos à saída do guincho. Assim, torna-se necessário determinar os ângulos entre os cabos antes e depois das polias, situadas acima do palco - figura 6.2, ang_1 e ang_2 . Os ângulos anteriormente referidos são calculados da seguinte forma:

$$\begin{cases} ang_1 = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \\ ang_2 = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \end{cases} [rad] \quad (5.7)$$

Uma vez determinados os ângulos das equações 5.7 pode-se avançar com o cálculo da tensão que o cabo está sujeito para cada instante à saída do tambor do guincho. Assim o cálculo é efectuado através das seguintes equações:

$$\begin{cases} T_{guincho1} = T_{AC} \cdot e^{\mu \cdot ang_1} \\ T_{guincho2} = T_{BC} \cdot e^{\mu \cdot ang_2} \end{cases} [N] \quad (5.8)$$

em que μ é o coeficiente de atrito entre a roldana e o cabo e tem o valor igual 0,25.[9]

5.2 Dinâmica incremental 2D

Para o cálculo dinâmico do comportamento do sistema, torna-se necessário referir que as acelerações estão interligadas com o movimento, alterando assim o cálculo para a determinação do valor das tensões exercidas nos cabos. Assim, contrariamente com o sucedido no capítulo anterior, é necessário discriminar as tensões nos seus versores. Nas seguintes equações encontram-se as equações necessárias para o cálculo dos versores

anteriormente referidos:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{1_{x_t}} = \cos(\alpha_t) \\ e_{1_{y_t}} = \sin(\alpha_t) \\ e_{2_{x_t}} = \cos(\beta_t) \\ e_{2_{y_t}} = \sin(\beta_t) \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Assim, sabendo-se o valor dos versores das tensões que estão interligados com a orientação dos cabos, em cada instante da trajectória, pode-se então construir a matriz das tensões, em concordância com o referencial inicialmente definido como se pode ver na figura 6.2 a azul, da seguinte forma:

$$e = \begin{bmatrix} -e_{1_{x_t}} & e_{2_{x_t}} \\ e_{1_{y_t}} & e_{2_{y_t}} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

De salientar, que a tensão exercida no cabo 1, decomposta em x, é sempre negativa devido ao referencial escolhido inicialmente.

Posto isto, torna-se necessário construir o vector das incógnitas a determinar, ou seja, o valor absoluto das tensões em cada instante da seguinte forma:

$$T = \left\{ \begin{array}{c} T1 \\ T2 \end{array} \right\} [N] \quad (5.11)$$

Será igualmente necessário definir o vector das forças externas que, no estudo dinâmico, incorporam-se as forças provocadas pelas acelerações, da seguinte forma:

$$F_{externas} = \left\{ \begin{array}{c} mA_x \\ Fg + mA_y \end{array} \right\} [N] \quad (5.12)$$

Através do seguinte sistema determinam-se as tensões $T1$ e $T2$ exercidas nos cabos:

$$e \times T = F_{externas} \quad (5.13)$$

Para se saber as tensões dos cabos à saída do tambor do guincho, volta a repetir-se o passo da equação 5.8 para o respectivo cabo.

Falta apenas determinar a potência mecânica necessária para cada cabo em cada instante. Assim, a potência calcula-se através da seguinte equação:

$$P_t = V_t T_{i_t} \quad (5.14)$$

Neste trabalho é desprezado o momento de inércia do corpo do executante, tal como do sistema de rotação.

5.3 Apresentação e discussão dos resultados

De modo a ilustrar a assertividade do modelo matemático desenvolvido no que à cinemática e dinâmica incremental diz respeito, apresenta-se na figura 5.3, 5.4 e 5.5, o comportamento do objecto quando o mesmo se desloca segundo a trajectória definida na figura 5.1.

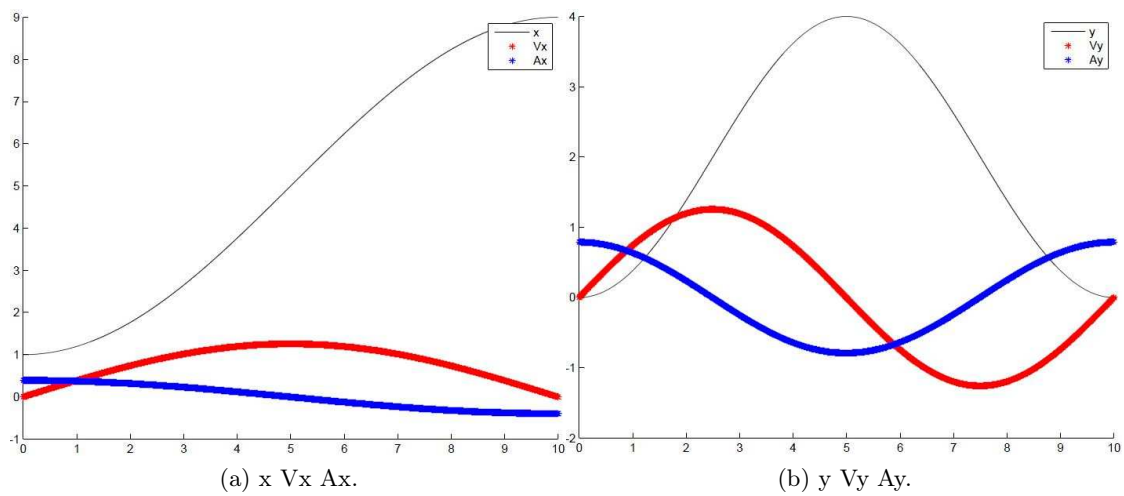


Figura 5.3: Componentes da posição, da velocidade e da aceleração instantânea.

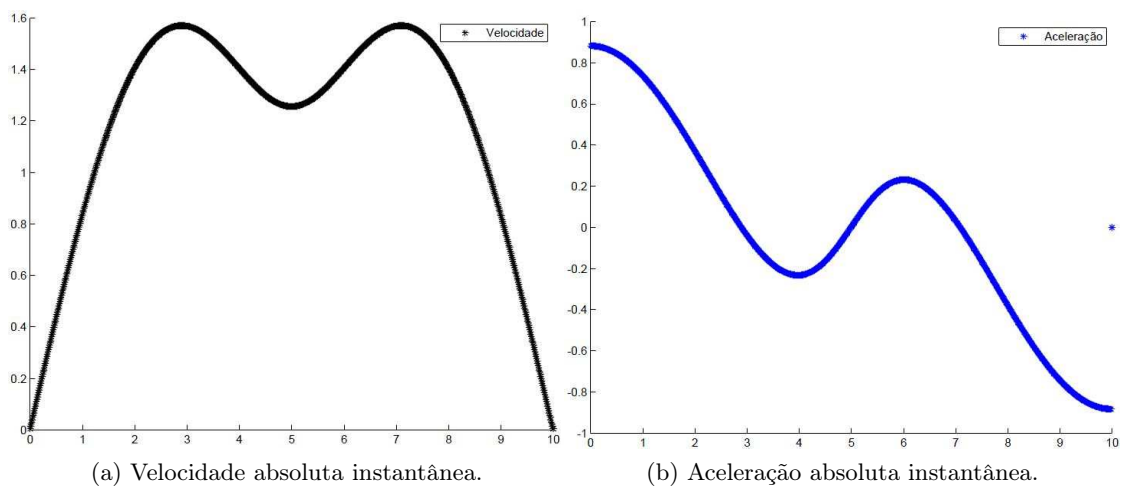


Figura 5.4: Velocidades e Acelerações absolutas para cada instante.

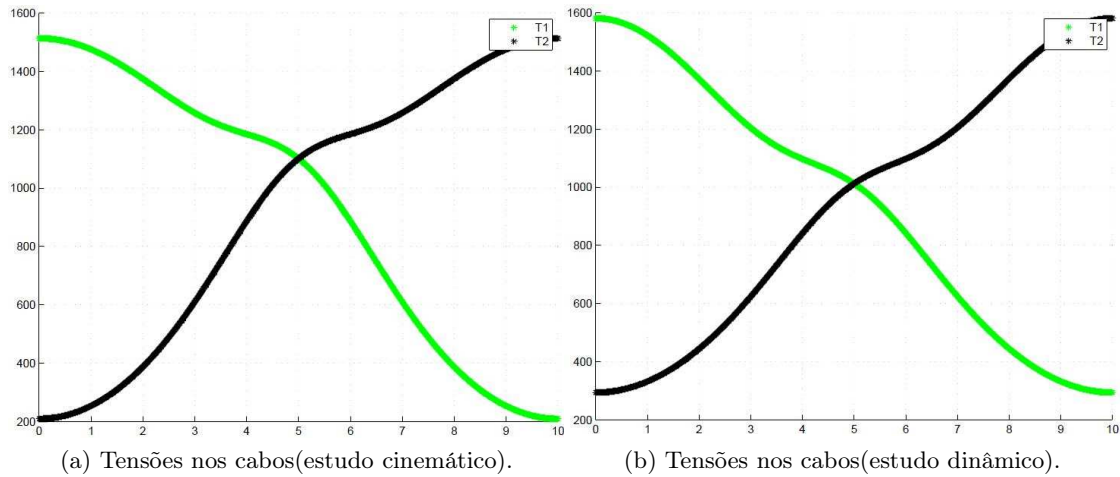


Figura 5.5: Tensões nos cabos em cada incremento para o estudo cinemático e dinâmico.

Os gráficos da figura 5.3 apenas se apresentam como apoio suplementar para verificar a assertividade do modelo matemático desenvolvido, no que diz respeito à posição em cada instante, tal como o resultado das duas derivadas procedentes, a velocidade e a aceleração (representação das componentes bidimensionais). Nos gráficos da figura 5.4, pode-se ver o comportamento do objecto ao longo da trajectória definida, verificando-se que não existem picos acentuados no que concerne à aceleração. Isto significa que a trajectória é efectuada de uma forma suave e com segurança, indo de encontro aos requisitos do utilizador. Em relação aos gráficos da figura 5.5, deve-se mencionar que o comportamento das tensões exercidas nos dois cabos constituintes do sistema de voo à saída do guincho encontra-se em concordância. Deste modo demonstra-se a assertividade do modelo matemático desenvolvido em Matlab[®] uma vez que, as curvas apresentadas são simétricas e de igual valor quando o sistema se encontra no meio da trajectória definida na figura 5.1.

Capítulo 6

Dimensionamento 3D

Este capítulo tem como objectivo o dimensionamento de um sistema de voo a três dimensões. Este voo é efectuado através do posicionamento de quatro guinchos aos quais estão enrolados quatro cabos, possibilitando uma execução de voo num paralelepípedo de dimensões variadas, mediante o posicionamento dos guinchos. Todos os cálculos para este dimensionamento serão efectuados, tal como no caso do dimensionamento em 2D, através de uma trajectória previamente definida como acontece com as dimensões do paralelepípedo - área de voo. Todo o processo é efectuado através de uma aproximação incremental.

A trajectória escolhida para execução do voo pode ser definida de duas formas: o utilizador poderá escolher entre uma trajectória dada por equações paramétricas ou através de pontos gravados dados pelo *software* desenvolvido em CARRANCA, 2012.[5] Quando os pontos são gravados neste software é criado um ficheiro do tipo *.txt* que poderão ser lidos directamente no Matlab[®]. Assim, quando estes pontos são lidos poderá desenhar-se a trajectória através de uma interpolação de pontos usando uma *B-Spline* cúbica com os pontos extremos encastrados. Por outras palavras, o *software* devolve n pontos no espaço e a trajectória começa a ser desenhada a partir do primeiro ponto passando por entre todos os outros pontos através de curvas e acabando no último ponto, como se pode ver na figura 6.1 com o traço a vermelho.

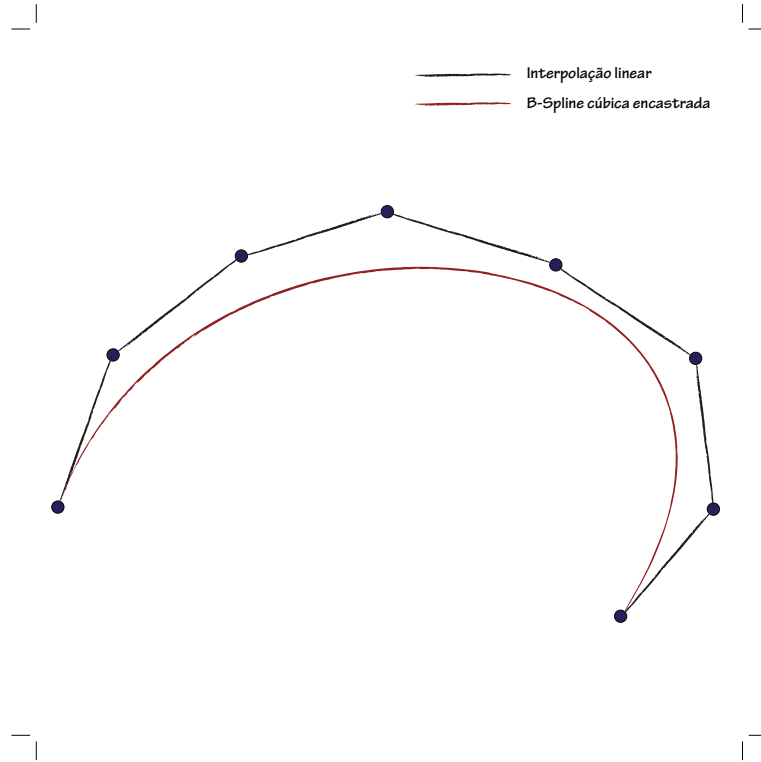


Figura 6.1: Exemplo de pontos gravados e trajectória desenhada através de uma interpolação linear e de uma B-Spline cúbica encastrada.

Foi utilizada esta técnica em detrimento de uma interpolação linear (traço preto na figura 6.1) para que a trajectória desenhada fosse o mais suave possível, trazendo um melhoramento visual para o espectáculo.

6.1 Cinemática incremental 3D

Trajectória com equações paramétricas

Para este caso de estudo, foi escolhido um espaço de voo com as seguintes dimensões: $distX = 20$, $distY = 20$, $distZ = 15$ e com a seguinte trajectória:

$$\begin{cases} x_t = 5\cos(t) \\ y_t = 5\sin(t) \\ z_t = -(\sin(t) + \cos(t) + t) - 5; \end{cases} \quad [m] \quad (6.1)$$

em que $t \in [0, 10]$ com mil pontos.

Na figura 6.2 pode-se ver o esquema onde se encontra a trajectória definida e as dimensões do espaço.

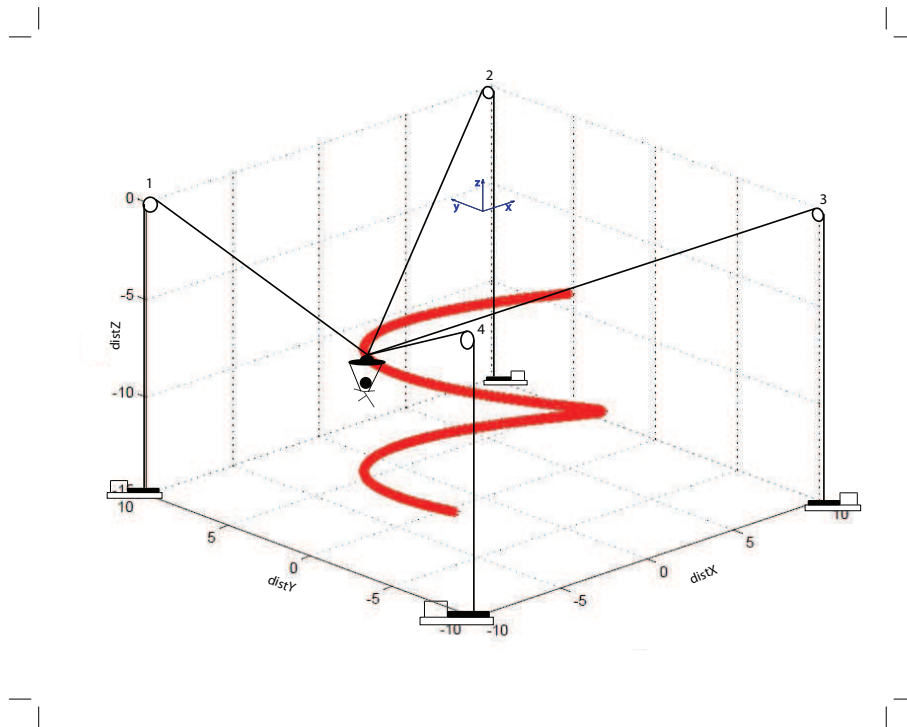


Figura 6.2: Esquema da trajectória definida num espaço 3D e posicionamento dos guinchos pelo método das equações paramétricas.

Para a execução da trajectória, foi definido um tempo total de dez segundos, com mil incrementos associados.

Trajectória com pontos vindos do *software*

Como foi anteriormente referido, a trajectória pode ser desenhada através de pontos seleccionados através do *software* desenvolvido e posteriormente desenhar-se a trajectória através de uma *B-Spline* cúbica encastrada. Assim, para este caso de estudo foi criado um ficheiro *.txt* com pontos gravados através do *software* como se pode ver na figura 6.3. No programa desenvolvido no Matlab[®], lêem-se a primeira, segunda e terceira coluna que são, respectivamente, as coordenadas dos pontos (x,y,z) e a quinta coluna onde se encontram as velocidades para cada segmento da B-Spline.

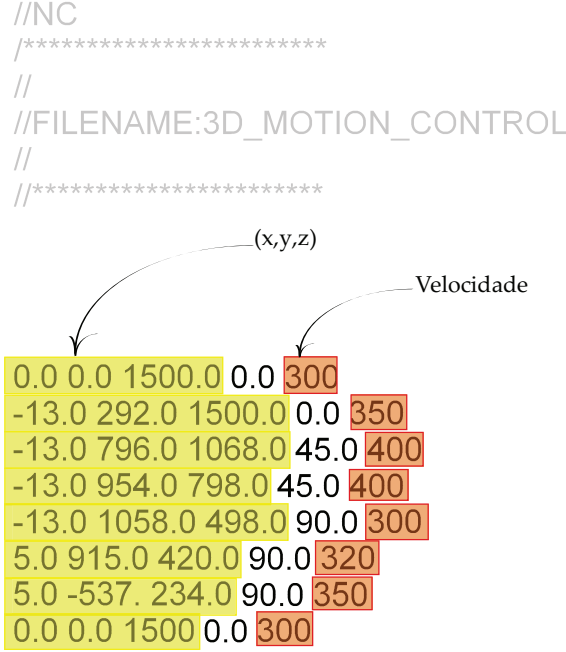


Figura 6.3: Pontos importados do *software* e utilizados no programa de Matlab® desenvolvido.

Esta hipótese traz a liberdade, dentro do razoável da segurança do que está a ser movimentado, da definição da velocidade em segmentos da trajectória, comparativamente com o método utilizado anteriormente.

De referir que o *software* devolve os pontos gravados com as suas coordenadas em *cm* no referencial global e a velocidade em $cm.s^{-1}$. Torna-se necessário efectuar a mudança de unidades para o Sistema Internacional de medição utilizado no programa em Matlab®, de forma a que os cálculos e resultados sejam coerentes.

Posto isto, o programa desenvolvido em Matlab® lê os pontos gravados e através da equação 6.2 cria uma nova função de pontos interpolados.

$$S_i(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \\ P_{i+3} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

onde i varia mediante o número de pontos gravados no *software* e $t \in [0,1]$ e determinado-se através da seguinte equação:

$$t = \frac{j}{n \text{ pontos}} \quad 0 < j < n \text{ pontos} \quad (6.3)$$

onde $n \text{ pontos}$ refere-se ao número de pontos interpolados entre dois pontos consecutivos gravados no *software*.

Sabendo-se o número de pontos interpolados torna-se necessário determinar as suas coordenadas no referencial global. Assim, através da equação 6.4 sabem-se as coordena-

das de cada ponto no espaço e pode então desenhar-se a trajectória.

$$\begin{cases} x = b_0 \times x_i + b_1 \times x_{i+1} + b_2 \times x_{i+2} + b_3 \times x_{i+3} \\ y = b_0 \times y_i + b_1 \times y_{i+1} + b_2 \times y_{i+2} + b_3 \times y_{i+3} \\ z = b_0 \times z_i + b_1 \times z_{i+1} + b_2 \times z_{i+2} + b_3 \times z_{i+3} \end{cases} \quad [m] \quad (6.4)$$

onde i é o ponto gravado anterior e $i + 1, i + 2, i + 3$ são os três pontos seguintes, sempre que necessário. As constantes b_0, b_1, b_2, b_3 são calculadas da seguinte forma:

$$\begin{cases} b_0 = \frac{it^3}{6} \\ b_1 = \frac{3 \times t^3 - 6 \times t^2 + 4}{6} \\ b_2 = \frac{-3 \times t^3 + 3 \times t^2 + 3 \times t + 1}{6} \\ b_3 = \frac{t^3}{6} \end{cases} \quad (6.5)$$

onde,

$$it = 1 - t \quad (6.6)$$

Uma vez criada a linha interpolada é gerado uma nova lista de pontos interpolados de modo a ilustrar a trajectória de movimento do sistema de voo como se pode ver na figura 6.4.

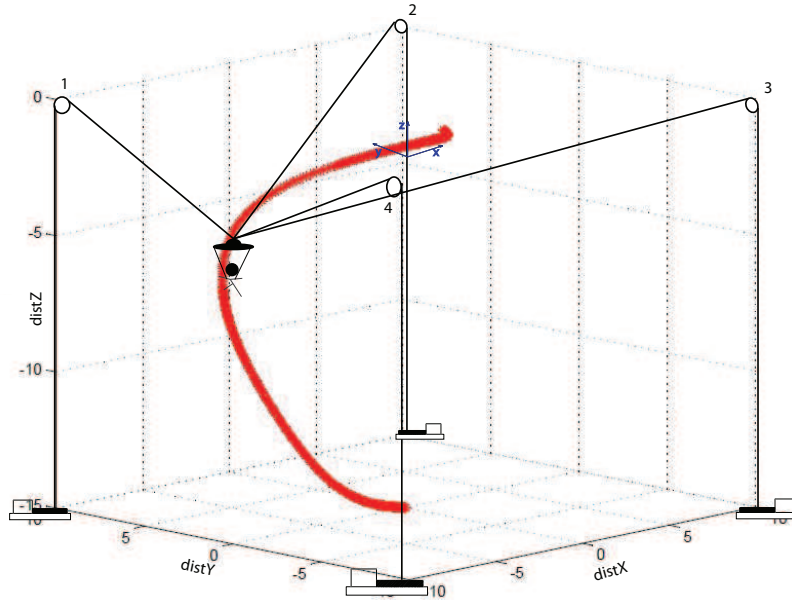


Figura 6.4: Esquema da trajectória definida num espaço 3D e posicionamento dos guinchos pelo método da *B-Spline*.

A partir deste ponto, não existe distinção de cálculo para os dois métodos de desenhar a trajectória definida.

O próximo passo no dimensionamento do sistema passa por calcular a velocidade e aceleração do objecto em cada instante. Assim, o cálculo das velocidades e acelerações instantâneas segundo os eixos x y são calculados da mesma forma que no caso em 2D, ou seja, através da equação 5.2. A única variação no cálculo é a existência da terceira dimensão z e calcula-se da seguinte forma:

$$\begin{cases} V_z(t) = \frac{z_{t+\Delta t} - z_t}{\Delta t} \\ A_z(t) = \frac{V_{z_{t+\Delta t}} - V_{z_t}}{\Delta t} \end{cases} \quad (6.7)$$

O cálculo da velocidade e aceleração absoluta em cada instante é calculado através das seguintes equações:

$$\begin{cases} V_t = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \\ A_t = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \end{cases} \quad (6.8)$$

O comprimento dos cabos para cada instante da trajectória é determinado da seguinte forma:

$$\begin{cases} L_{1t} = \sqrt{\left(\left(\frac{distX}{2} + x_t\right)^2 + \left(-\frac{distY}{2} + y_t\right)^2 + z_t^2\right)} \\ L_{2t} = \sqrt{\left(\left(\frac{distX}{2} - x_t\right)^2 + \left(-\frac{distY}{2} + y_t\right)^2 + z_t^2\right)} \\ L_{3t} = \sqrt{\left(\left(\frac{distX}{2} - x_t\right)^2 + \left(\frac{distY}{2} + y_t\right)^2 + z_t^2\right)} \\ L_{4t} = \sqrt{\left(\left(\frac{distX}{2} + x_t\right)^2 + \left(\frac{distY}{2} + y_t\right)^2 + z_t^2\right)} \end{cases} \quad (6.9)$$

Para a determinação dos ângulos para cada instante da posição do sistema, torna-se necessário calcular o valor do comprimento dos cabos nas projecções OXY, como se pode ver na figura 6.6. Assim, o comprimento das projecções dos cabos é calculado da seguinte forma:

$$l_{it} = \sqrt{L_{it}^2 - z_t^2} \quad (6.10)$$

em que o índice $i = 1, 2, 3, 4$ refere-se ao número do cabo em causa.

Na figura 6.6 pode ver-se o esquema das projecções dos cabos em OXY para o cálculo necessário dos ângulos θ .

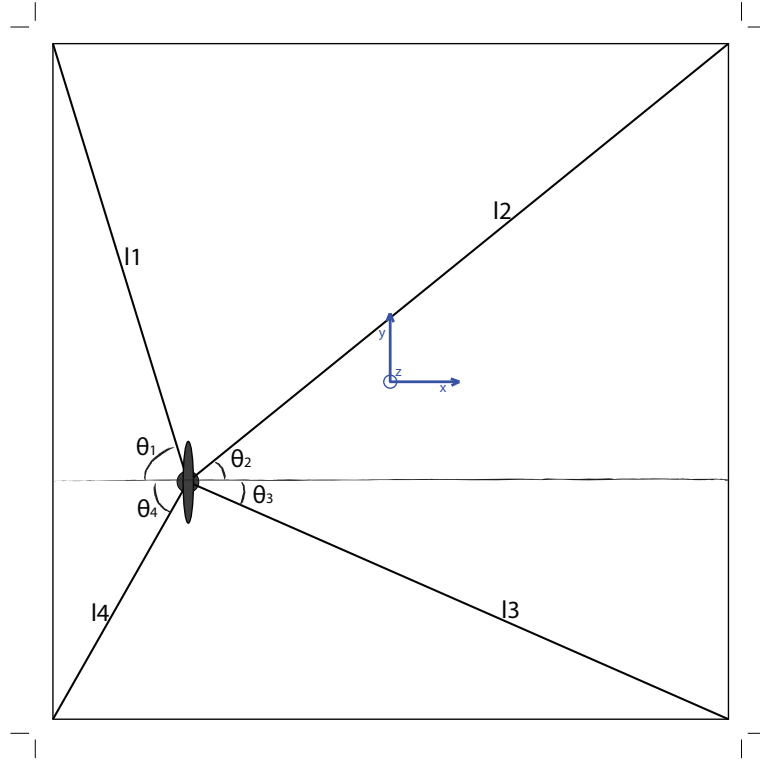


Figura 6.5: Ângulos na projecção OXY

Assim, os ângulos θ_i com $i = 1, 2, 3, 4$ representados na figura anterior, calculam-se através das seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{1_t} = \sin^{-1} \left(\frac{\left\| \frac{-distY}{2} + y_t \right\|}{l_{1_t}} \right) \\ \theta_{2_t} = \sin^{-1} \left(\frac{\left\| \frac{-distY}{2} + y_t \right\|}{l_{2_t}} \right) \\ \theta_{3_t} = \sin^{-1} \left(\frac{\left\| \frac{distY}{2} + y_t \right\|}{l_{3_t}} \right) \\ \theta_{4_t} = \sin^{-1} \left(\frac{\left\| \frac{distY}{2} + y_t \right\|}{l_{4_t}} \right) \end{array} \right. \quad (6.11)$$

Para o cálculo das tensões exercidas em cada cabo é necessário definir primariamente os versores do mesmos, com as direcções dos cabos. Assim, os valor dos versores calculam-

se da seguinte forma:

$$\begin{cases} e_{ix_t} = \left(\frac{l_{it}}{L_{it}}\right) \cos(\theta_{it}) \\ e_{iy_t} = \left(\frac{l_{it}}{L_{it}}\right) \sin(\theta_{it}) \\ e_{iz_t} = \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{l_{it}}{L_{it}}\right)\right) \end{cases} \quad (6.12)$$

em que o índice $i = 1, 2, 3, 4$ refere-se ao número do cabo em causa.

O cabo escolhido para o funcionamento do sistema de voo é um cabo composto por 7x19 - figura 6.6, aço inoxidável AISI316 o qual é utilizado numa vasta gama de aplicações. É um cabo extremamente flexível e só é utilizado quando é realmente necessário um cabo de aço inoxidável com tamanha flexibilidade. Como os cabos têm extrema importância neste sistema, e devido à segurança de tudo o que o envolve, torna-se necessário escolher um cabo de alta qualidade. Este cabo é também utilizado na indústria naval entre outras áreas. O cabo escolhido para este trabalho tem 10mm de diâmetro nominal e uma carga de ruptura de $EA = 36kN$. [27], sendo que este valor é constante para os quatro cabos.

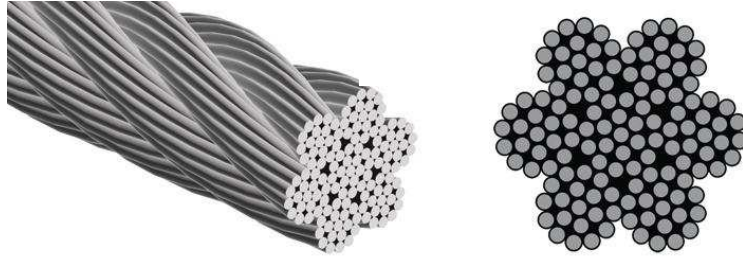


Figura 6.6: Cabo 7x19 aço inoxidável AISI316 utilizado[27]

Assim, pode-se então calcular a rigidez de cada cabo através da seguinte equação:

$$K_{it} = \frac{EA}{L_{it}} \quad (6.13)$$

O uso exclusivo das equações de equilíbrio da Estática é insuficiente para a solução deste problema, uma vez que existem mais ligações do que as estritamente necessárias para assegurar o equilíbrio do sistema. Neste caso, seriam apenas necessários três cabos (sistema é constituído por quatro cabos) para que o equilíbrio do sistema de voo fosse assegurado totalmente. Com a utilização das equações de equilíbrio da Estática, o sistema é indeterminado, tratando-se de um problema hiperestático ou estáticamente indeterminado - número de incógnitas superior ao número de equações. Para se contornar este problema, recorreu-se ao Princípio do Trabalho Virtuais que consiste na aplicação de um deslocamento virtual. Assim, as componentes das tensões a determinar apresentam-se na

seguinte equação:

$$\begin{cases} T_{ix} = K_{it} \left(e_{ix_t}^2 \delta_x + e_{iy_t} e_{ix_t} \delta_y + e_{iz_t} e_{ix_t} \delta_z \right) \\ T_{iy} = K_{it} \left(e_{ix_t} e_{iy_t} \delta_x + e_{iy_t}^2 \delta_y + e_{iz_t} e_{iy_t} \delta_z \right) \\ T_{iz} = K_{it} \left(e_{ix_t} e_{iz_t} \delta_x + e_{iy_t} e_{iz_t} \delta_y + e_{iz_t}^2 \delta_z \right) \end{cases} \quad (6.14)$$

onde δ_x, δ_y e δ_z representam as componentes do deslocamento virtual imposto e que deverá ser calculado.

Para o cálculo do deslocamento virtual, temos a matriz das tensões:

$$T = \begin{bmatrix} \sum K_{it} e_{ix_t}^2 & \sum K_{it} e_{iy_t} e_{ix_t} & \sum K_{it} e_{iz_t} e_{ix_t} \\ \sum K_{it} e_{ix_t} e_{iy_t} & \sum K_{it} e_{iy_t}^2 & \sum K_{it} e_{iz_t} e_{iy_t} \\ \sum K_{it} e_{ix_t} e_{iz_t} & \sum K_{it} e_{iy_t} e_{iz_t} & \sum K_{it} e_{iz_t}^2 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

O vector deslocamento virtual:

$$\delta = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{Bmatrix} \quad (6.16)$$

e o vector das forças externas que, para o caso estático, apenas se considera a força vertical do o peso da pessoa e o do sistema rotativo:

$$F_{externas} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ Fg \end{Bmatrix} \quad (6.17)$$

Através da equação seguinte, consegue-se calcular o valor das componentes do deslocamento virtual:

$$T \times \delta = F_{externas} \quad (6.18)$$

Sabendo-se o valor de cada componente do deslocamento virtual, pode então calcular-se os valores das tensões absolutas para cada cabo, para cada instante, a partir da seguinte equação:

$$T_{it} = K_{it} \sqrt{(e_{ix_t} \delta_x)^2 + (e_{iy_t} \delta_y)^2 + (e_{iz_t} \delta_z)^2} [N] \quad (6.19)$$

Sabendo-se a tensão que exercido em cada cabo pela força vertical constante, poderá prosseguir-se para o cálculo final de tensão dos cabos à saída do guincho, tal como acontece no problema do capítulo anterior em 2D. Assim, torna-se necessário determinar os ângulos entre os cabos antes e depois das roldanas situadas acima do palco, ang_1, ang_2, ang_3 e ang_4 . Os ângulos anteriormente referidos são calculados da seguinte forma:

$$ang_i = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{l_{it}}{L_{it}} \right) \right) [rad] \quad (6.20)$$

Uma vez determinados os ângulos das equações 6.20 pode-se prosseguir com o cálculo da tensão que o cabo está sujeito para cada instante à saída do tambor do guincho. Assim o cálculo é efectuado através da seguinte equação:

$$T_{i_{guincho_t}} = T_{it} \cdot e^{\mu \cdot \text{ang}_i} \quad (6.21)$$

6.2 Dinâmica incremental 3D

Ao contrário do estudo cinemático, a dinâmica lida com o movimento físico de um corpo.

A diferença de cálculo do valor das tensões exercidas nos cabos na secção anterior, encontra-se na definição do vector das forças externas. Assim, esse vector passa a contar com as três componentes da aceleração como se pode ver na equação seguinte:

$$F_{externas} = \left\{ \begin{array}{c} mA_x \\ mA_y \\ Fg + mA_z \end{array} \right\} \quad (6.22)$$

No caso deste trabalho, é desprezado o momento de inércia tanto do corpo do executante, como do sistema de rotação.

Potência mecânica necessária para cada cabo:

$$P_t = V_t T_{it} \quad (6.23)$$

6.3 Apresentação e discussão dos resultados

Apresenta-se na figura 6.7 três gráficos referentes ao comportamento do objecto segundo cada componente tridimensional, durante a trajectória definida através das equações paramétricas. Esta figura apenas serve para comprovar que o modelo matemático desenvolvido é fiável, uma vez que se podem ver facilmente a posição e as duas derivadas procedentes, ou seja, a velocidade e aceleração em cada instante.

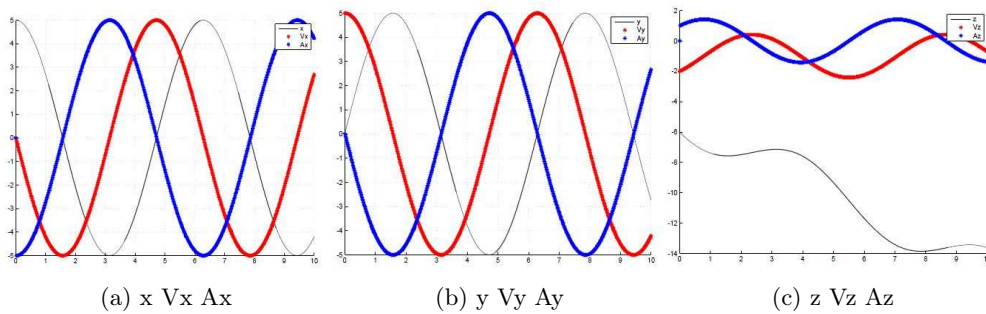


Figura 6.7: Componentes da posição, da velocidade e da aceleração instantânea para a trajectória definida através de equações paramétricas.

Na figura 6.8 apresenta-se o comportamento do sistema durante a trajectória, no que diz respeito à sua velocidade e aceleração absolutas.

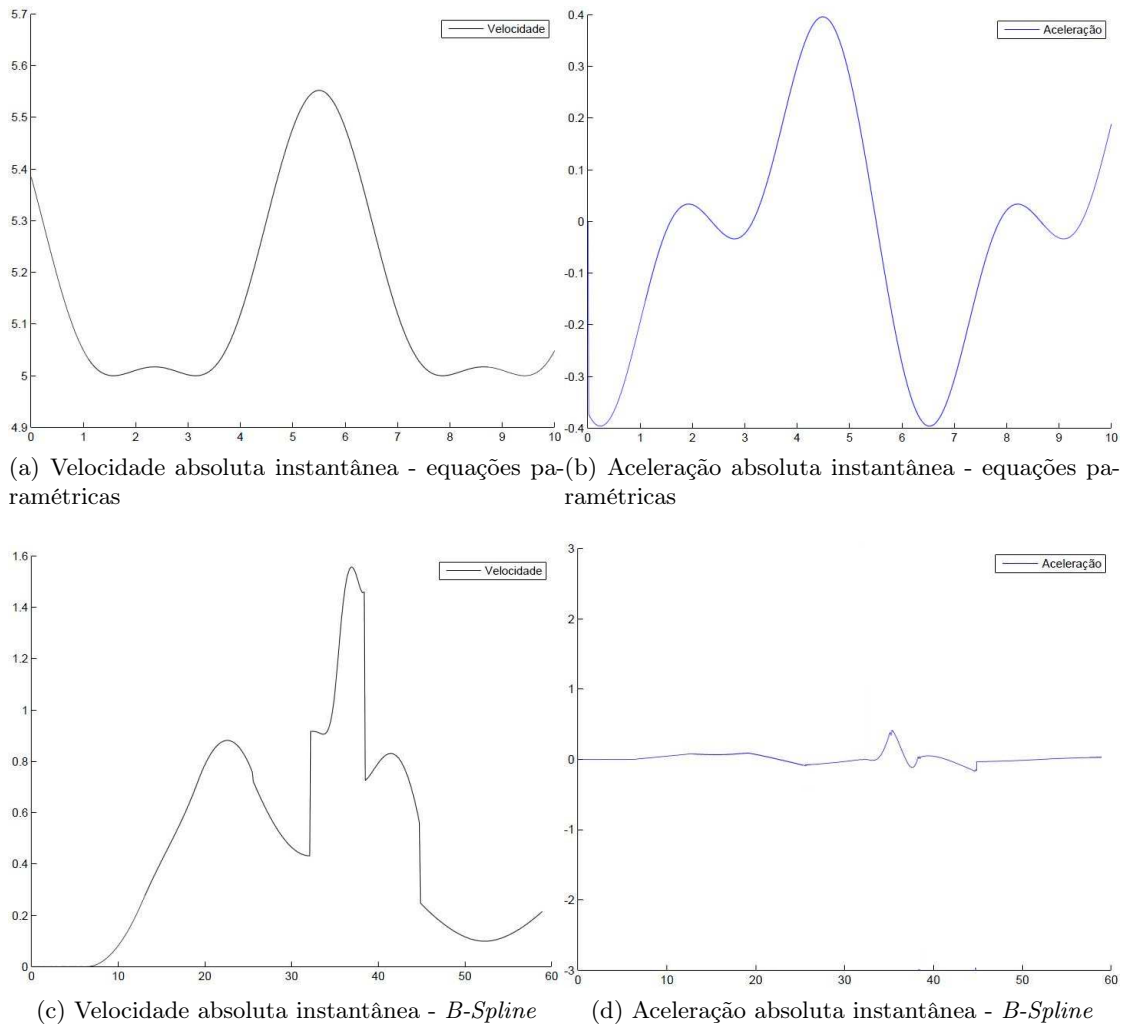


Figura 6.8: Velocidades e Acelerações absolutas para cada instante para os dois métodos utilizados para a definição da trajectória.

Verifica-se que no caso da definição da trajectória através das equações paramétricas, o movimento é efectuado de uma forma suave sem que haja variação brusca de velocidade ou aceleração. No caso da definição da trajectória através da importação de pontos do *software* desenvolvido, uma vez que as velocidades para cada segmento da trajectória são definidas, verificam-se pequenos picos tanto no gráfico da velocidade como na aceleração. Tal sucede devido à definição da velocidade imposta no início de cada segmento, ou seja, o sistema movimenta-se com uma certa velocidade num determinado segmento da trajectória. Quando se encontra no ponto de partida do segmento seguinte, com uma velocidade imposta diferente, haverá um pequeno pico para estabelecer a velocidade do segmento seguinte. Como se pode verificar pelo gráfico (6.8c e 6.8d), não existem picos efectivamente preocupantes, tanto para a segurança do sistema como para a suavidade da trajectória.

Na figura 6.9 apresentam-se os gráficos das tensões exercidas nos cabos à saída de cada guincho para ambos os métodos de definição da trajectória, no que diz respeito

ao comportamento dinâmico do sistema. Neste caso não se apresentam os resultados do estudo do comportamento cinemático uma vez que a sua relevância é questionável aquando da necessidade de escolha dos guinchos a utilizar no sistema.

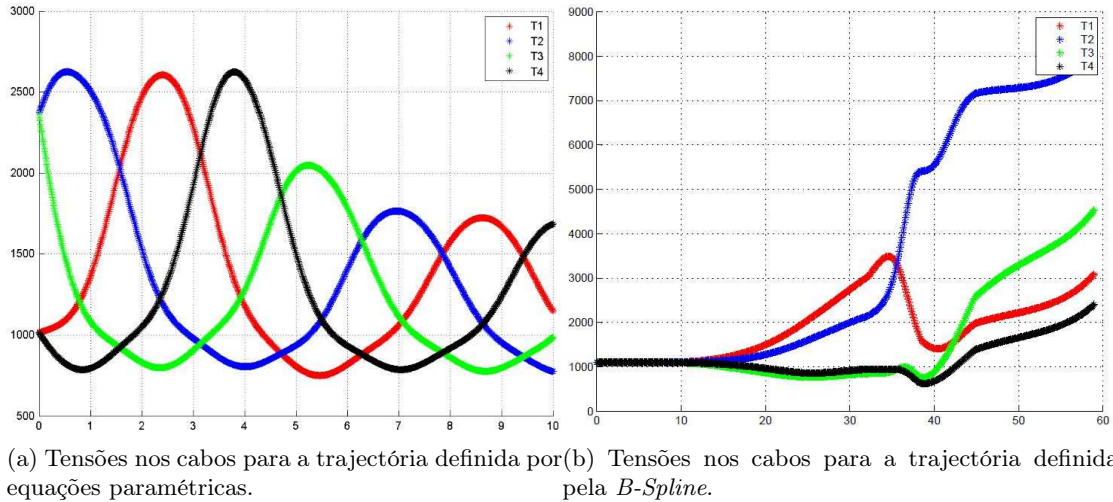


Figura 6.9: Tensões nos cabos em cada incremento para o estudo dinâmico para ambos os métodos da definição da trajectória.

O gráfico apresentado na figura 6.9a representa os valores das tensões exercidas nos quatro cabos constituintes de sistema durante a trajectória definida na figura 6.2 enquanto que na figura 6.9b o gráfico representa os valores das tensões para o caso da definição da trajectória pelo método de importação dos dados do *software*. Pode-se verificar o aumento substancial dos valores das tensões a partir do trinta segundos, uma vez que a trajectória se aproxima do topo do espaço de voo definido, onde as tensões exercidas nos cabos são máximas.

Para que o dimensionamento do sistema esteja completo, torna-se necessário escolher o guincho apropriado. Assim, a empresa *Stage Technologies* possui uma vasta gama de guinchos desenvolvido para a Indústria do Entretenimento e o guincho escolhido é um *BigTow* - BT2-290. Embora não sendo facultadas as propriedades do guincho no que à potência do motor, velocidade angular bem como dimensões dizem respeito, é possível seleccionar um guincho mediante a velocidade máxima necessária e o peso do corpo a levantar - figura 6.10. A escolha deste *BigTow* recai no facto de nesta aplicação específica se ter uma velocidade máxima de $6ms^{-1}$ e um peso total de $120kg$. Na verdade seria apenas necessário o modelo BT2-200 para este sistema. No entanto acautela-se um intervalo de peso ligeiramente superior passível de ser usado em aplicações mais exigentes recaindo a escolha no modelo de *BigTow* acima mais potente.[29]

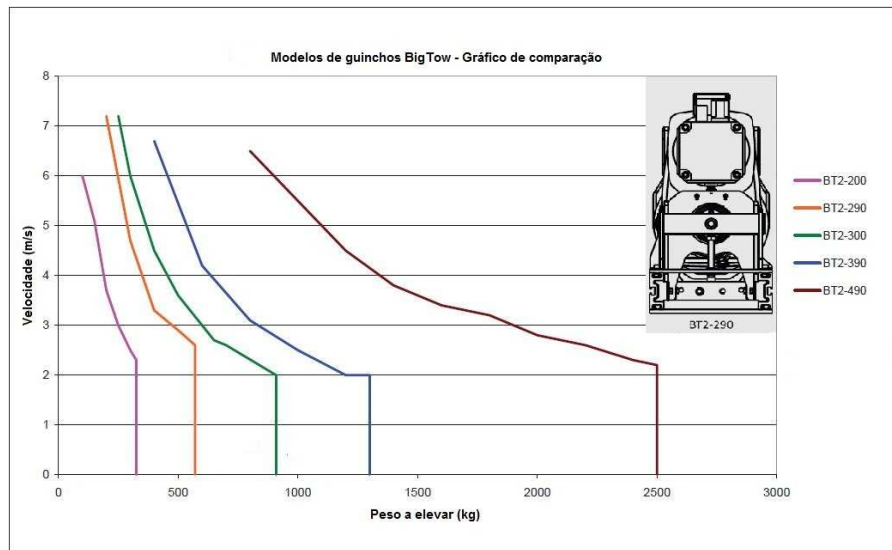


Figura 6.10: Gráfico para a escolha do guincho e guincho escolhido[29]

Assim, o sistema de voo terá quatro guinchos *BigTow* modelo BT2-290 6.10 com as seguintes características chave:

- tecnologia *Zero-fleet*;
- dois travões independentes situados na entrada e saída do veio (projectados para assegurar 125% da carga estática);
- motor de indução AC;
- *Encoder* de alta precisão;
- funcionamento silencioso;

Parte III

Conclusões e Trabalho Futuro

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Para esta dissertação foi proposta uma modelação matemática das estruturas de sustentação por cabos, de geometria temporalmente variável para uma actividade lúdica. Embora a aplicação tenha sido referida para simulações cinéfilas e teatrais, é indiscutível que o método pode permitir treinos de biodinâmica nas atitudes de um astronauta sob baixa gravidade, bem como para outras aplicações onde este estudo possa ser valorizado.

Esta formulação matemática, desenvolvido a partir de técnicas de integração incremental dos parâmetros cinemáticos de trajectórias de sólidos seguras por cabos, previsivelmente com equações matemáticas complexas e de solução trabalhosa, por recurso a desenvolvimento de *software* em Matlab[®]. Este desenvolvimento teve ainda como premissa a apresentação da solução do problema de forma gráfica e intuitiva, permitindo assim ao utilizador do sistema uma visualização assertiva das variáveis de controlo do sistema. Deste modo, cabe apenas ao utilizador a selecção da trajectória, ficando o ónus da solução a cargo do modelo matemático desenvolvido. Os resultados apresentados nos gráficos permitem também instruir o utilizador acerca da melhor solução no que concerne à escolha do guincho.

Urge pois concluir que o trabalho realizado nesta dissertação embora cumpra com os objectivos inicialmente preconizados tem espaço para melhorias e desenvolvimentos futuros. Por exemplo seria interessante incluir a influência de alterações das características inerciais do corpo a movimentar no caso, por exemplo, do *performer* quando se altera a sua atitude na abertura ou fecho dos braços, mudando assim a sua matriz de inércia. Outro ponto de interesse de trabalho futuro seria a da inclusão de uma biblioteca de guinchos e, aquando dos resultados obtidos do Matlab[®], permitir uma escolha imediata com uma margem de segurança aceitável. Seria igualmente interessante, o dimensionamento minucioso do sistema de rotação conceptual sugerido neste trabalho, no que diz respeito ao dimensionamento do veio de rotação e rolamentos, potência do motor e capacidade das baterias. Findo este processo, realizar um caderno de encargos e construir o modelo físico numa perspectiva de teste da sua viabilidade de funcionamento e segurança. Teoricamente, o produto tem todo o potencial para ter sucesso e poderá ser inserido no mercado, de forma a concorrer directamente com os sistemas já utilizados na Indústria do Entretenimento, com um preço de custo muito superior à hipótese desenvolvida neste trabalho.

Bibliografia

- [1] Bal. N.d. *Servo Control Facts - A Handbook Explaining the Basics of Motion*.
- [2] *Broadway Season Statistics*. 2012. Acedido a 30 de Agosto de 2012.
URL: <http://www.broadwayleague.com/>
- [3] Clive Baker, William Cruse, J. Michael Gillette. 2011. "Stage Machinery." *Encyclopaedia Britannica* .
- [4] *Controlled motor technology*. N.d. Acedido a 1 de Setembro de 2012.
URL: <http://www.sem.co.uk/applications/>
- [5] d'Abreu Fernandes Carranca, Ricardo Luis. 2012. 3D motion control with axis interpolation. Master's thesis Universidade de Aveiro.
- [6] DaLYD. N.d. "Spidercam.". Acedido.
URL: <http://www.flickr.com/photos/daly3d/3580955635/>
- [7] Daniel. 2012. "Broadway Brought 11.2 Billion to NYC in 2010-11 Season.". Acedido a 30 de Agosto de 2012.
URL: <http://www.backstage.com/news/broadway-brought-112-billion-to-nyc-in-2010-11-season/>
- [8] Hastie, Mark Anger & John. 2009. *Automation in the Entertainment Industry*. ET PRESS.
- [9] Hendrickson, Alan. 2008. *Mechanical Design for the Stage*. Focal Press.
- [10] Jeffers, Zoe Brooks. 2010. "Flying into History - Hemp System.". Acedido a 20 de Setembro de 2012.
URL: http://zozone.com/nhd_project_edit2.html
- [11] JR . 2005. *Rigging System Design Guide*.
- [12] Kalpesh B. Pathak, Ketan K. Acharya. 2011. "Automation in Entertainment Industry."
- [13] Lampert-Greaux, Ellen. 2011. "Fisher Technical Services Flies High With Spider-Man." *Live Design* .
- [14] *Love - A New Classic from The Beatles and Cirque du Soleil*. 2006.

- [15] Masnick, Mike. 2012a. "The sky is rising for the entertainment industry.". Acedido a 30 de Agosto de 2012.
URL: <http://www.wired.co.uk/news/archive/2012-02/23/the-sky-is-rising>
- [16] Masnick, Mike. 2012b. "The Sky Is Rising: The Entertainment Industry Is Large & Growing... Not Shrinking.". Acedido a 30 de Agosto de 2012.
URL: <http://www.techdirt.com/articles/20120129/17272817580/sky-is-rising-entertainment-industry-is-large-growing-not-shrinking.shtml>
- [17] *Matlab*. 2012.
URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [18] *On Stage Lighting*. 2008. Acedido a 26 de Setembro de 2012.
URL: <http://www.onstagelighting.co.uk/learn-stage-lighting/the-best-way-to-learn-stage-lighting/>
- [19] *O YOU GOT TO SEE THIS!!!* 2012. Acedido a 26 de Setembro de 2012.
URL: <http://spreadluv.com/2011/07/04/o-you-got-to-see-this/>
- [20] *Phantom at The Venetian*. 2011. Acedido a 10 de Outubro de 2012.
URL: <http://www.fishertechnical.org>
- [21] PRG. 2012. "Spider-Man: Turn Off the Dark Takes Entertainment Technology To A New Level.". Acedido a 20 de Outubro de 2012.
URL: <http://www.prg.com/about-us/projects-showcase/spider-man-turn-off-the-dark-takes-entertainment-technology-to-a-new-level/>
- [22] Rooney, David. 2011. "'Spider-Man' still a bloated monster with bad music." *Reuters* .
- [23] *Spidercam*. 2011. Acedido a 28 de Setembro de 2012.
URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Spidercam>
- [24] *Spidercam*. 2012. Acedido a 28 de Setembro de 2012.
URL: <http://dev.spidercam.org/en>
- [25] *Spider-Man: Turn Off the Dark goes to the limits - and beyond*. 2011. Acedido a 21 de Outubro de 2012.
URL: <http://www.stage-directions.com/gear/3535-staging-spider-man.html>
- [26] *Stage Machinery and Whispering Winch Systems*. 2012. Acedido a 1 de Setembro de 2012.
URL: <http://www.statec.de/en/gallery/understage.html>
- [27] *Stainless Steel Ropes*. 2012. Acedido a 8 de Novembro de 2012.
URL: <http://www.steelwirerope.com/WireRopes/Constructions/MarineGrade/7x19-stainless-steel-wire-rope.html>
- [28] *Super Hero Snapshots*. 2012. Acedido a 25 de Outubro de 2012.
URL: <https://www.facebook.com/SpiderManOnBroadway>

-
- [29] Technologies, Stage. 2012. “BigTow Winches.” 9 Falcon Park, Neasden Lane, London NW10 1RZ, UK: . Acesso em: <http://www.stagetechnologies.com/sites/default/files/TECHBTW1012V2.pdf>.
- [30] Waibel, Markus. 2010. “The r3 Rope Robot.”. Acedido a 25 de Outubro de 2012. **URL:** <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/medical-robots/eth-zurich-r3-rope-robot>
- [31] weatherford, Mike. 2011. “Chandelier one of the stars of Phantom – The Las Vegas Spectacular.” *Las Vegas Review - Journal* .
- [32] Young, I.R. 1974. “Automation in television and the theatre.” *Electronics & Power* .